

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

DIPLOMSKI RAD

Mentor

prof.dr.sc. Ivica Smojver

Hrvoje Rafael

Zagreb, 2008.

Sažetak

Ovaj se rad bavi analizom oštećenja unutarnjeg pretkrilca zrakoplova Airbus A320 između pozicija WFX 2650 i WFX 3225.

U uvodu je dan osvrt na način na koji dolazi do oštećenja uzrokovanih sudarom sa pticama i gdje su najveći rizici da se takvo što dogodi.

Drugo poglavlje detaljnije opisuje koji dio konstrukcije je modeliran i kako je sam model izveden. Poblje je objašnjeno koja su pojednostavnjenja uzeta u obzir i iz kojih razloga, a i pokazano je kako je modeliran udarač koji u analizi služi kao zamjena za pticu.

Treće poglavlje govori o tome koje parametre materijala i kako treba definirati za izvođenje jedne ovakve analize. Govori se i o materijalnim modelima koji su upotrebljeni i čija je upotreba bila razmatrana tokom izrade rada.

U četvrtom poglavlju ukratko su nabrojane i objašnjene vrste nelinearnosti do kojih dolazi prilikom numeričkih simulacija ovakvih događaja. Sažeto je opisana i metoda kojom je izvršena analiza i pokazane su neke njene prednosti i nedostaci. Navedeni su početni uvjeti analize i pretpostavke na kojima se oni temelje. I na kraju su prikazani rezultati dobiveni za šest slučajeva opterećenja.

Sadržaj

1	Uvod.....	1
2	Izrada modela za analizu.....	3
2.1	Konstrukcija.....	3
2.1.1	Modeliranje konstrukcije.....	6
2.1.2	Povezivanje ljuskastih i trodimenzionalnih dijelova konstrukcije.....	12
2.2	Udarač.....	14
3	Definiranje Materijala.....	15
3.1	Definiranje metalnih materijala konstrukcije.....	15
3.1.1	Stvarne deformacije i naprezanja.....	16
3.1.2	Definiranje plastičnosti u Abaqus-u.....	17
3.1.3	Ovisnost plastičnih naprezanja o brzini deformiranja.....	21
3.1.4	Kriterij popuštanja.....	22
3.2	Definiranje materijala za udarač.....	22
3.2.1	Definiranje hiperelastičnog materijala u Abaqus-u.....	24
4	Analiza.....	27
4.1	Nelinearna analiza.....	27
4.1.1	Materijalna nelinearnost.....	27
4.1.2	Nelinearnost rubnih uvjeta.....	28
4.1.3	Geometrijska nelinearnost.....	28
4.2	Nelinearna eksplicitna analiza.....	28
4.3	Početni uvjeti.....	30
4.4	Rezultati.....	32
4.4.1	Numeričke nestabilnosti u analizi.....	32
4.4.2	Slučaj 1.....	35
4.4.3	Slučaj 2.....	39
4.4.4	Slučaj 3.....	42
4.4.5	Slučaj 4.....	47
4.4.6	Slučaj 5.....	51
4.4.7	Slučaj 6.....	55
5	Zaključak.....	58
6	Literatura.....	59

Popis slika

Slika 1.1. Oštećenja na pretkrilcu nastala uslijed udara ptice [2]	1
Slika 2.1. Pozicija pretkrilca na krilu [3]	3
Slika 2.2. Modelirani dio pretkrilca [3]	3
Slika 2.3 Gornja i donja projekcija pretkrilca (označen modelirani dio) [3]	4
Slika 2.4. Dodatno rebro [3]	4
Slika 2.5. Glavno rebro 3 [3]	5
Slika 2.6. Glavno rebro 4 [3]	6
Slika 2.7. Stvarni izgled glavnog rebra 3	7
Slika 2.8. Model konačnih elemenata glavnog rebra	9
Slika 2.9. CAD model ljuskastog dijela konstrukcije	10
Slika 2.10. CAD model ljuskastog dijela konstrukcije bez gornje oplate	10
Slika 2.11. Različite debljine dodijeljene ljuskastim elementima	11
Slika 2.12. Primjer korištenja shell-to-solid veze[12]	12
Slika 2.13. Ljuskasta površina i površina na trodimenzionalnom tijelu [12]	13
Slika 2.14. Prikaz tlačnog ispitivanja i nepovezanih čvorova uz faktor povećanja	13
Slika 2.15. Oblik udarača	14
Slika 3.1. Hookeov dijagram [5]	16
Slika 3.2. Kvalitativna usporedba između stvarnih i nominalnih odnosa naprezanja i deformacija kod čelika [6]	17
Slika 3.3. Rastavljanje ukupne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu	19
Slika 3.4. Usporedba nominalnih [7] i stvarnih naprezanja za aluminijsku leguru 2024-T42	20
Slika 3.5. Prikaz utjecaja bazine deformiranja [s^{-1}] na naprezanja u materijalu	21
Slika 3.6. Usporedba materijalnih modela	23

Slika 3.7. Vrste ispitivanja koje se mogu koristiti za definiranje hiperelastičnog materijalnog modela [12]	25
Slika 3.8. Rezultati jednoosnog i ravninskog tlačnog ispitivanja balističkog gela [11]	26
Slika 4.1. Greda koja nailazi na prepreku	28
Slika 4.2. Velike deformacije uklještene grede	28
Slika 4.3. Tri mjesta udara na modelu	31
Slika 4.4. Napadni kutevi udara	32
Slika 4.5. Utjecaj numeričkih nestabilnosti na naprezanja i deformacije	33
Slika 4.6. Prikaz nestabilnosti u dijagramu energija	34
Slika 4.7. Prikaz rubova isključenih iz kinematskih veza	34
Slika 4.8. Ortogonalni prikaz udara za slučaj 1 (s gornje strane)	35
Slika 4.9. Naprezanja po von Misesu za slučaj 1 (0-0.002 s)	36
Slika 4.10. Naprezanja po von Misesu za slučaj 1 (0.003-0.005 s)	37
Slika 4.11. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 1	38
Slika 4.12. Dijagram ukupnih energija za slučaj 1	38
Slika 4.13. Naprezanja po von Misesu za slučaj 2 (0-0.002 s)	39
Slika 4.14. Naprezanja po von Misesu za slučaj 2 (0.003-0.005 s)	40
Slika 4.15. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 2	41
Slika 4.16. Dijagram ukupnih energija za slučaj 2	41
Slika 4.17. Ortogonalni prikaz udara za slučaj 3 (s gornje strane)	42
Slika 4.18. Naprezanja po von Misesu za slučaj 3 (0-0.002 s)	43
Slika 4.19. Naprezanja po von Misesu za slučaj 3 (0.003-0.005 s)	44
Slika 4.20. Popuštanje rebra u slučaju 3	45

Slika 4.21. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 3	46
Slika 4.22. Dijagram ukupnih energija za slučaj 3	46
Slika 4.23. Naprezanja po von Misesu za slučaj 4 (0-0.002 s)	47
Slika 4.24. Naprezanja po von Misesu za slučaj 4 (0.003-0.005 s)	48
Slika 4.25. Popuštanje rebra u slučaju 4	49
Slika 4.26. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 4	50
Slika 4.27. Dijagram ukupnih energija za slučaj 4	50
Slika 4.28. Ortogonalni prikaz udara za slučaj 5 (s donje strane).....	51
Slika 4.29. Naprezanja po von Misesu za slučaj 5 (0.0-0.002 s)	52
Slika 4.30. Naprezanja po von Misesu za slučaj 5 (0.003-0.005 s)	53
Slika 4.31. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 5	54
Slika 4.32. Dijagram ukupnih energija za slučaj 5	54
Slika 4.33. Naprezanja po von Misesu za slučaj 6 (0-0.002 s)	55
Slika 4.34. Naprezanja po von Misesu za slučaj 6 (0.003-0.005 s)	56
Slika 4.35. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 6	57
Slika 4.36. Dijagram ukupnih energija za slučaj 6	57

Popis tablica

Tablica 2.1. Podaci o konačnim elementima	8
Tablica 3.1.. Mehanička svojstva materijala korištenih u modelu [7]	20

Popis oznaka

Oznaka	Jedinica	Opis
A	m^2	trenutačni presjek epruvete
A_0	m^2	početni presjek epruvete
c_d		valna brzina
E	GPa	modul elastičnosti
G	GPa	modul smicanja
G_0	GPa	početni modul smicanja
I		matrica unutrašnjih sila
K	GPa	volumenski modul elastičnosti
l	m	mjerna duljina napregnute epruvete
l_0	m	početna mjerna duljina epruvete
L^e		najmanja duljina konačnog elementa
M		čvorna matrica mase
P		matrica vanjskih sila
u		matrica pomaka u čvorovima
ü		matrica ubrzanja u čvorovima

Grčke oznake

Oznaka	Jedinica	Opis
ε^{el}		stvarne elastične deformacije
ε^{pl}		stvarne plastične deformacije
$\bar{\varepsilon}^{pl}$		ekvivalentne plastične deformacije

ε^t		stvarne ukupne deformacije
ε_{nom}		nominalne deformacije
ν		Poissonov koeficijent
ξ		koeficijent prigušenja
ρ	kg/m ³	gustoća
ρ_0	kg/m ³	početna gustoća
σ	MPa	stvarno naprezanje
$\sigma_{0,2}$	MPa	granica plastičnosti
σ_m	MPa	čvrstoća materijala
σ_{nom}	MPa	nominalna naprezanja
ω		parametar oštećenja
ω_{max}		najviša vlastita frekvencija

Izjava

Izjavljujem da sam diplomski rad izradio samostalno koristeći navedenu literaturu i znanje stečeno tijekom studija. Stručnu pomoć u odabiru literature kao i korisne savjete tijekom izrade diplomskog rada pružio mi je mentor Prof. dr. sc. Ivica Smojver, na čemu mu se ovom prilikom zahvaljujem.

Hrvoje Rafael

1 Uvod

Iako je zračni prijevoz jedan od najsigurnijih oblika transporta postoje naizgled nevažni događaji koji mogu bitno utjecati na njegovu sigurnost. Jedan od takvih događaja sudar zrakoplova s pticama. Sudari s pticama nisu novost, a ni rijetkost, događaju se od kada postoji zrakoplovstvo. No u današnje vrijeme rasta, u nekim područjima već ionako vrlo gustog zračnog prometa, veća pažnja treba biti posvećena i takvim stvarima.

U nekim dijelovima svijeta je proteklih desetljeća došlo do znatnog porasta broja ptica selica [1], što može prouzročiti mnogo problema na područjima preko kojih te ptice prolaze. Za nas može biti zanimljivo da takve pojave mogu utjecati i na naše prostore. Tako na primjer neke vrste većih ptica iz istočne Europe svake godine u jatima sele prema Africi, prelazeći područje istočnog Mediterana. Slične rute se protežu i preko Apeninskog i Iberijskog poluotoka.

Sudari s pticama se bilježe i na visinama preko 3000 m, ipak najveći dio sudara se dogodi na relativno malim visinama. Čak oko 80% sudara s oštećenjima se dogodi na visinama do 1800 m [1], što znači da je za komercijalne putničke zrakoplove najveća mogućnost da se to dogodi prilikom faza slijetanja i polijetanja.

Po učestalosti udara ptica, krila su odmah iza motora i nosa zrakoplova, a na krilu je najizloženiji dio njegovo pretkrilce. Na slici 1.1. su prikazana pretkrilca komercijalnog putničkog zrakoplova oštećena u sudaru s pticama.



Slika 1.1. Oštećenja na pretkrilcu nastala uslijed udara ptice [2]

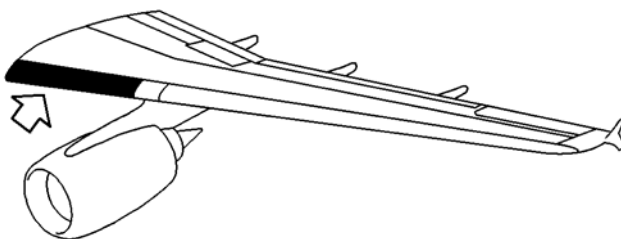
U ovom radu se analiziraju oštećenja nastala uslijed udara ptice u aluminijsku konstrukciju unutarnjeg pretkrilca putničkog zrakoplova Airbus A320 u uvjetima koji

odgovaraju fazi polijetanja i slijetanja. Analiza je izvršena metodom konačnih elemenata, a u pripremi i izvođenju su korišteni programski paketi *SolidWorks 2007*, *MSC Nastran for Windows 2005* i *Abaqus 6.7*. Osnovna namjera nije bila ispitivati otpornost konstrukcije na udar, već isprobati nove i napredne mogućnosti suvremenog softvera i pokušati pronaći način kako najučinkovitije provesti takvu simulaciju.

2 Izrada modela za analizu

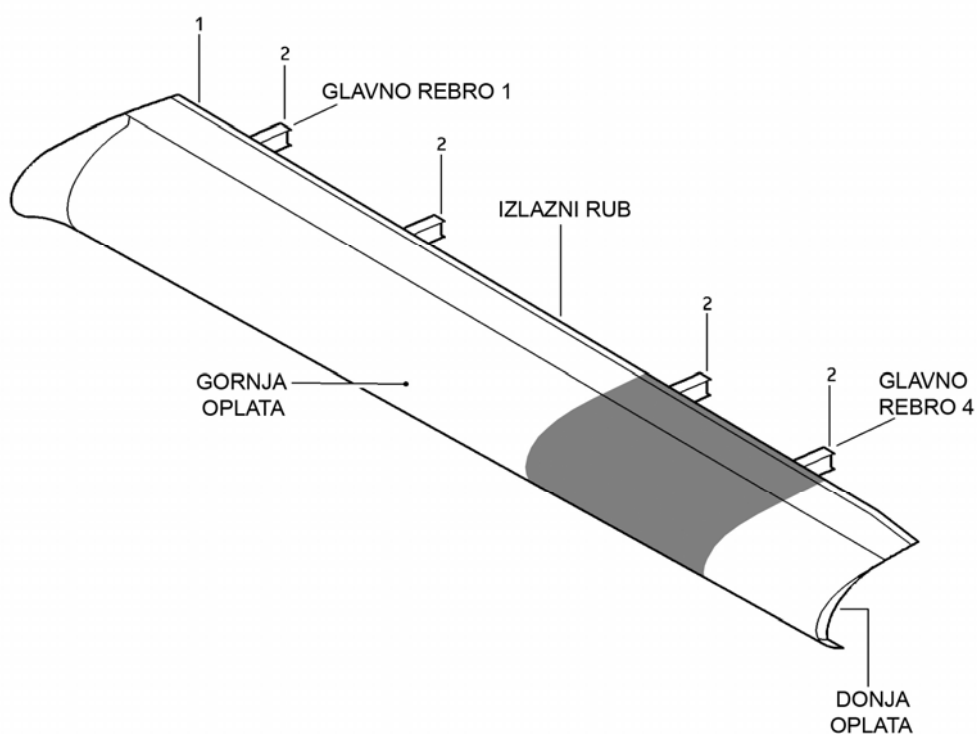
2.1 Konstrukcija

Za analiziranje je odabrano lijevo unutarnje pretkrilce, koje se nalazi između trupa i motora.



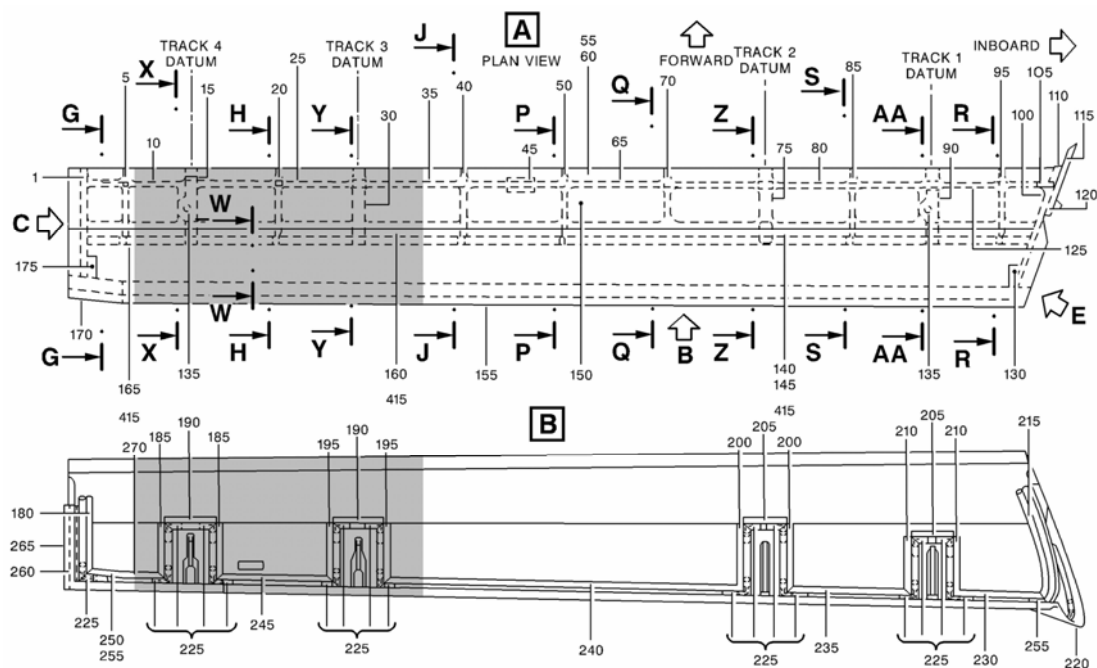
Slika 2.1. Pozicija pretkrilca na krilu [3]

Modeliran je vanjski dio pretkrilca između pozicija WFX 2500 i WFX 3360 (slika 2.1.). Obuhvaćena su glavna rebra 3 i 4, na pozicijama WFX 2650 i WFX 3225.

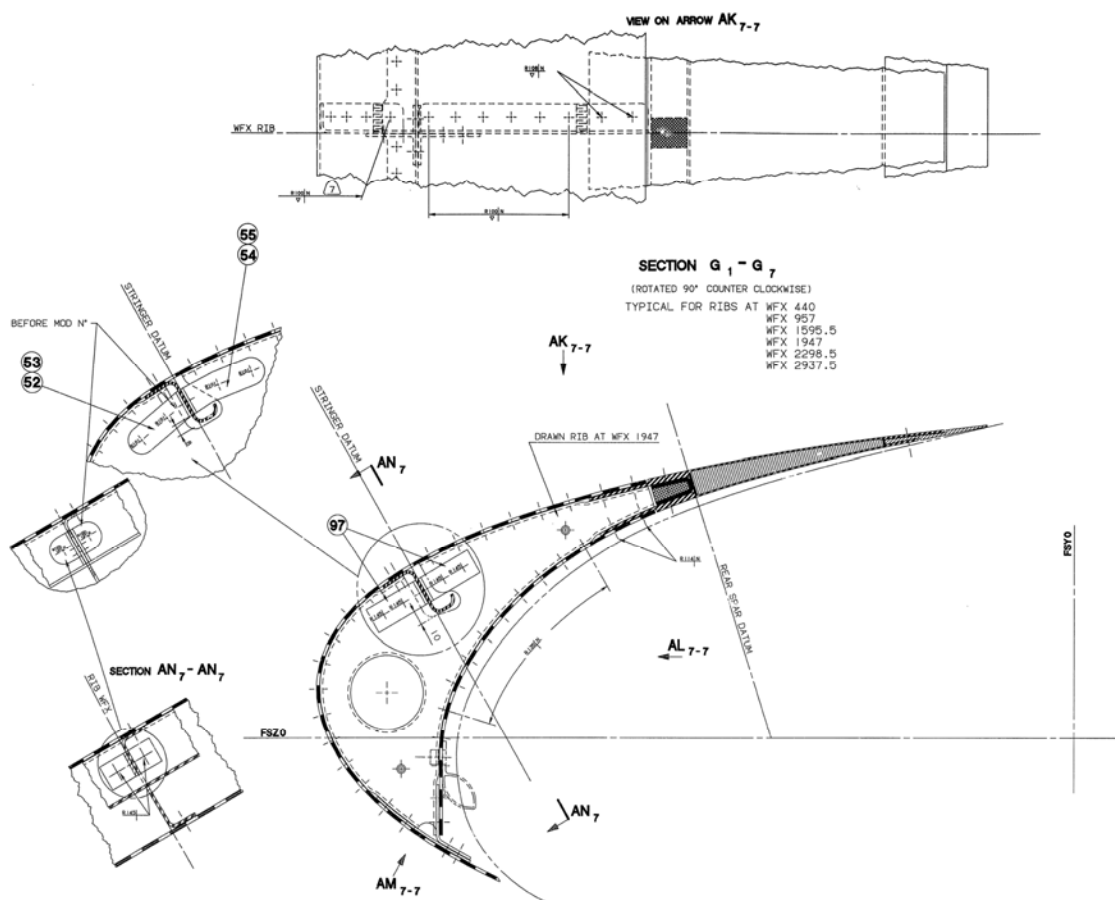


Slika 2.2. Modelirani dio pretkrilca [3]

Geometrija konstrukcije je određena korištenjem Priručnika za popravke (*Structural Repair Manual* [3][1]) i nacрта za spajanje zakivanjem.



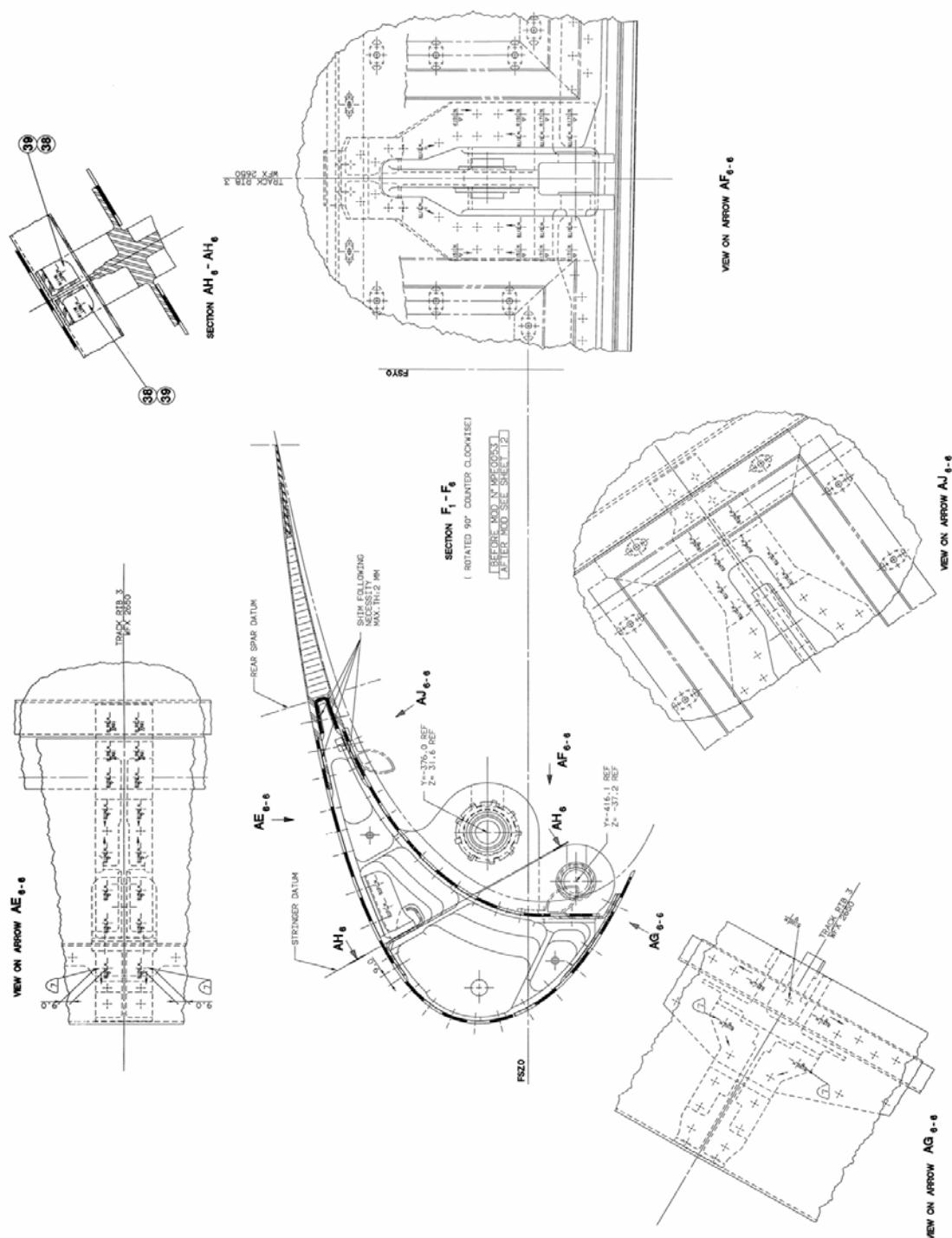
Slika 2.3 Gornja i donja projekcija pretkrilca (označen modelirani dio) [3]



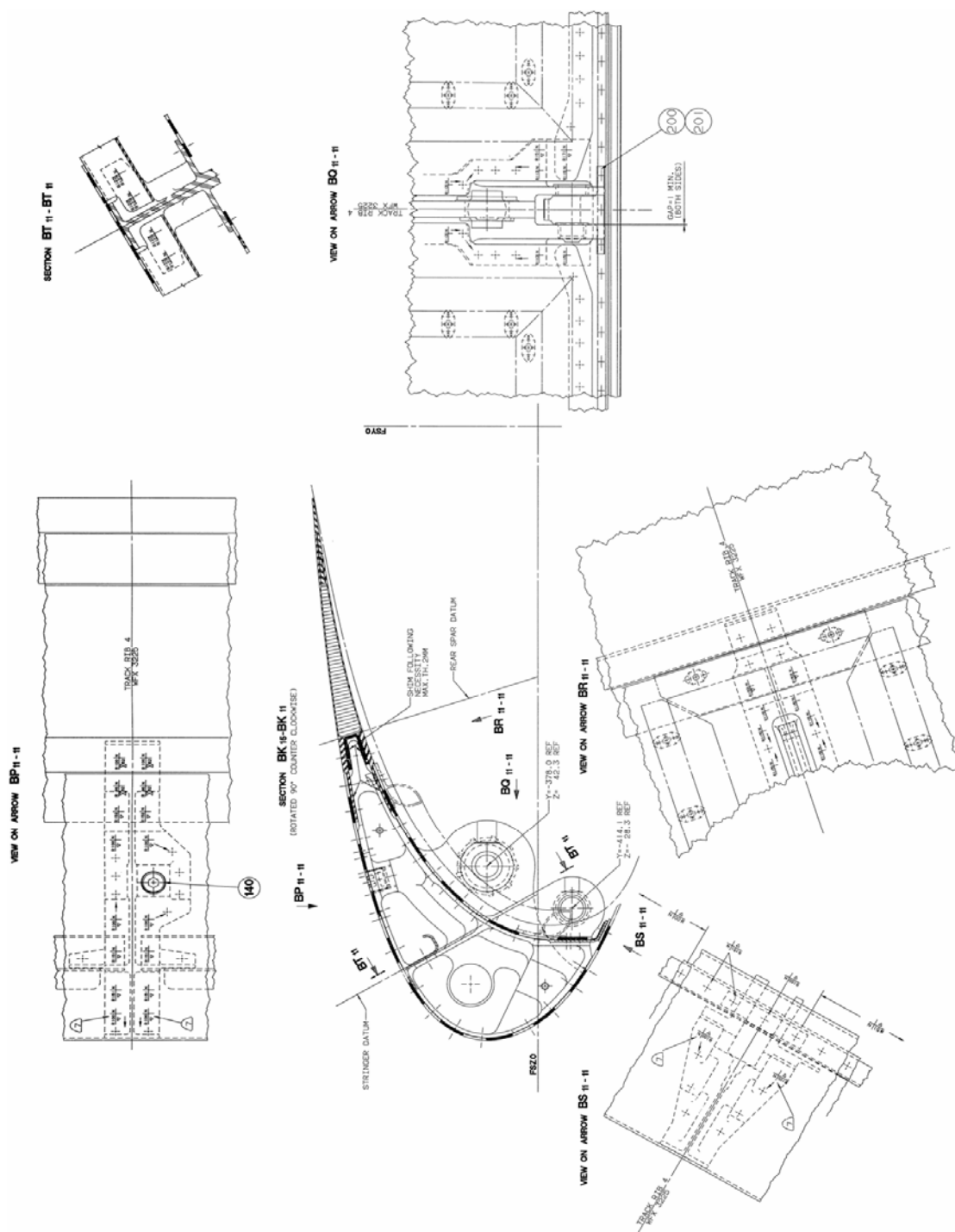
Slika 2.4. Dodatno rebro [3]

Između glavnih rebara se nalazi još jedno dodatno rebro (slika 2.4.), za ukrućivanje konstrukcije, a izlazni rub je ispunjen aluminijskim saćem.

Glavna rebra su masivnija i na sebi imaju okove koji služe za prihvat vodicica po kojima se cijelo pretkrilce kliže prema naprijed i prema dolje. Duž cijele konstrukcije, s prednje gornje strane, prolazi još i jedan Z-profil, koji također služi kao ukruta.



Slika 2.5. Glavno rebro 3 [3]

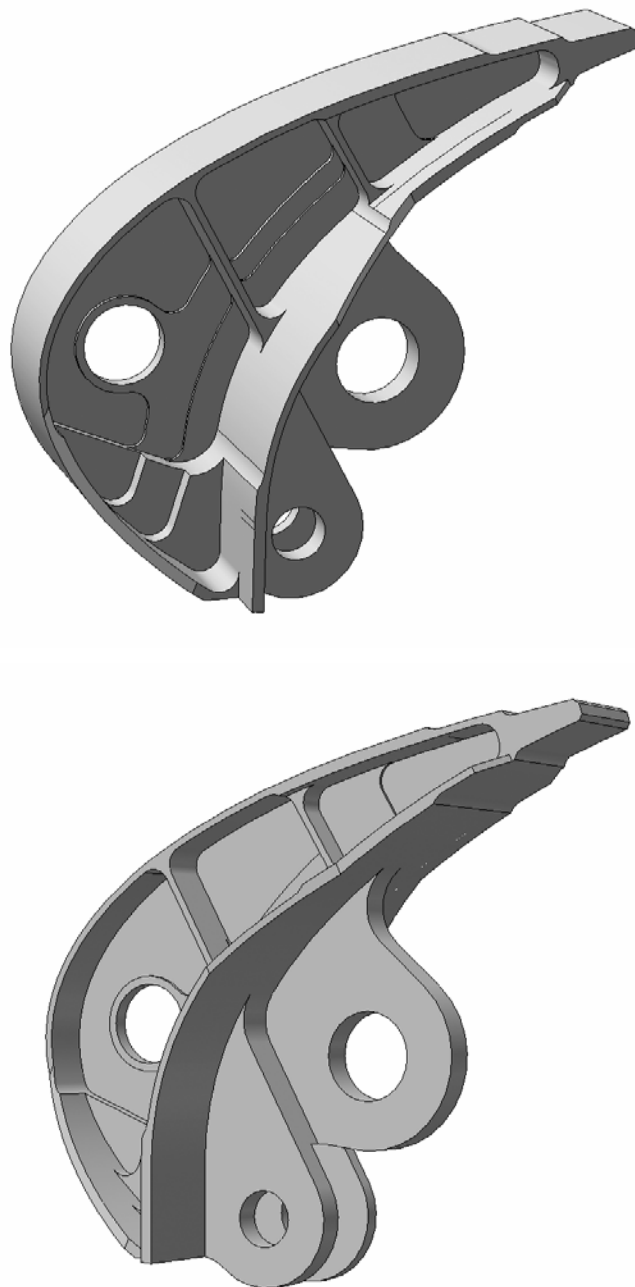


Slika 2.6. Glavno rebro 4 [3]

2.1.1 Modeliranje konstrukcije

Veći dio konstrukcije se sastoji od oplata debljine 2 mm, dok su samo glavna rebra izrađena od većih komada aluminija, postupkom glodanja (slika 2.7.). Zbog toga je odlučeno da se glavna rebra i sačasta konstrukcija izlaznog brida, modeliraju kao trodimenzionalna tijela, a ostatak konstrukcije kao ljuske. Svi dijelovi su modelirani

korištenjem računalnog programa *SolidWorks*, a zatim su diskretizirani konačnim elementima u predprocesoru programa *MSC Nastran for Windows*, prije nego što su prebačeni u *Abaqus*, i pripremljeni za analizu.



Slika 2.7. Stvarni izgled glavnog rebra 3

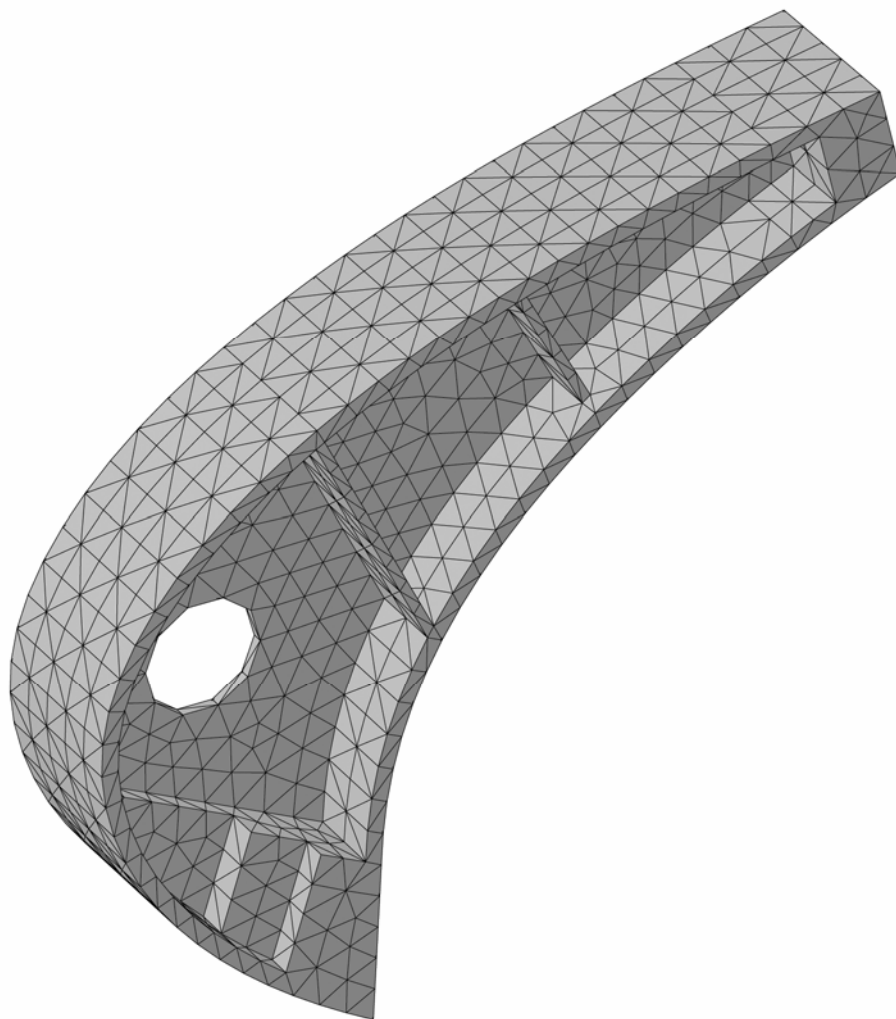
Prilikom diskretizacije trodimenzionalnih rebara su korišteni tetraedarski elementi C3D4 sa po četiri čvora. Sačasta konstrukcija izlaznog ruba je također diskretizirana prizmatičnim elementima sa 6 i 8 čvorova (C3D6R i C3D8R), dok su za tankostjene

dijelove većinom korišteni četverokutni S4R elementi sa po četiri čvora, uz poneki trokutni S3R element.

Tablica 2.1. Podaci o konačnim elementima

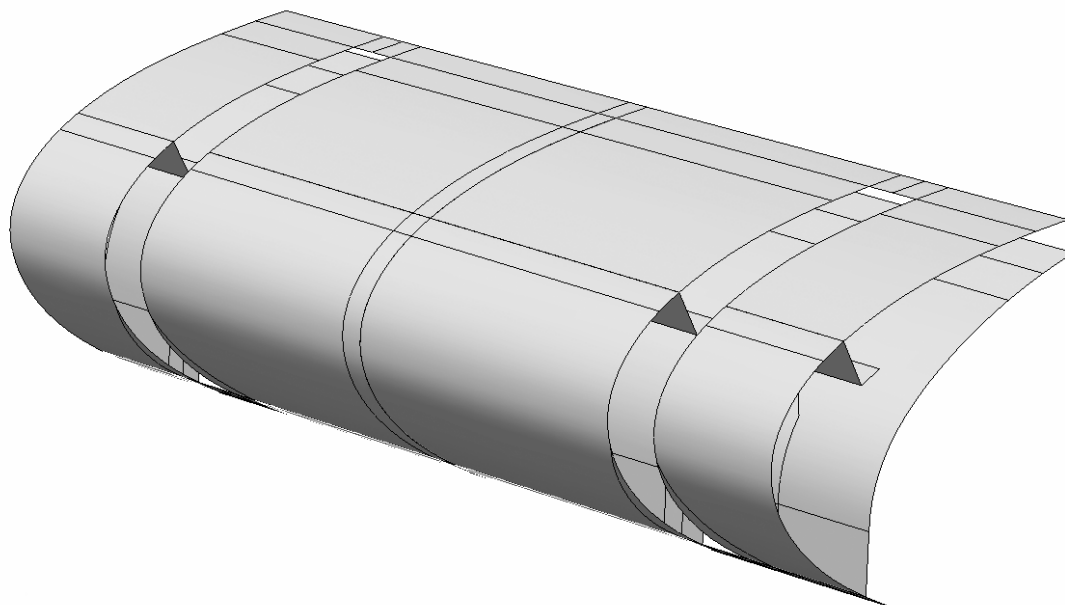
	broj elemenata	broj čvorova
glavno rebro 3	3798	1326
glavno rebro 4	3513	1226
ljuska	7182	7469
saćasta konstrukcija	5829	7656
ukupno	20322	17677

Prilikom modeliranja su neki dijelovi konstrukcije pojednostavljeni . Tako su izostavljeni detalji na glavnim rebrima koji, zbog veličine konačnih elemenata, niti ne bi mogli biti pretvoreni iz CAD modela u mrežu konačnih elemenata. To je, na primjer, bio slučaj sa zaobljenjima. Također, središnja stjenka pravog rebra ima tri različite debljine koje su vrlo slične, tako da je za tu stjenku uzeta srednja vrijednost. Proširenja koja služe za spajanje rebara i ljuskaste konstrukcije su izuzeta s glavnih rebara, a njihova je debljina pribrojena ljuskastim elementima oplata. Isto tako su izostavljeni i okovi, te su čvorovi, na mjestima gdje bi trebali biti okovi, uklješteni. To su i jedini rubni uvjeti na modelu, jer se pretpostavilo da su okovi i mehanizam za izvlačenje pretkrilaca dovoljno kruti, u odnosu na ostatak konstrukcije, da se njihovi pomaci i deformacije mogu zanemariti.

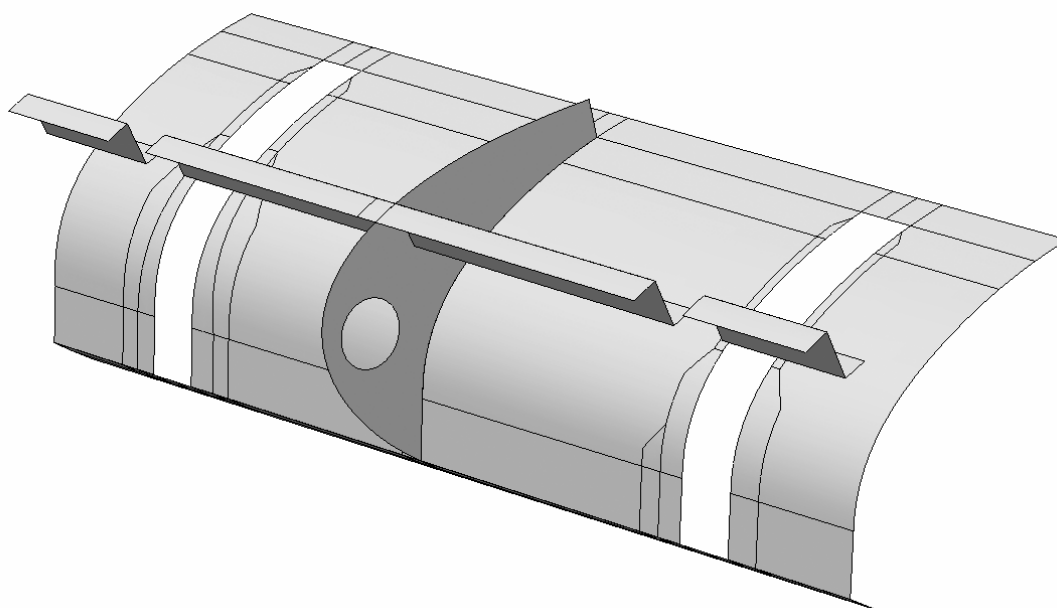


Slika 2.8. Model konačnih elemenata glavnog rebra

Oplata i ostali ljuskasti dijelovi modelirani su u CAD programu kao površine bez dimenzije debljine. Na tim površinama su linijama podijeljena područja različitih debljina lima i spojevi (slike 2.9. i 2.10.).

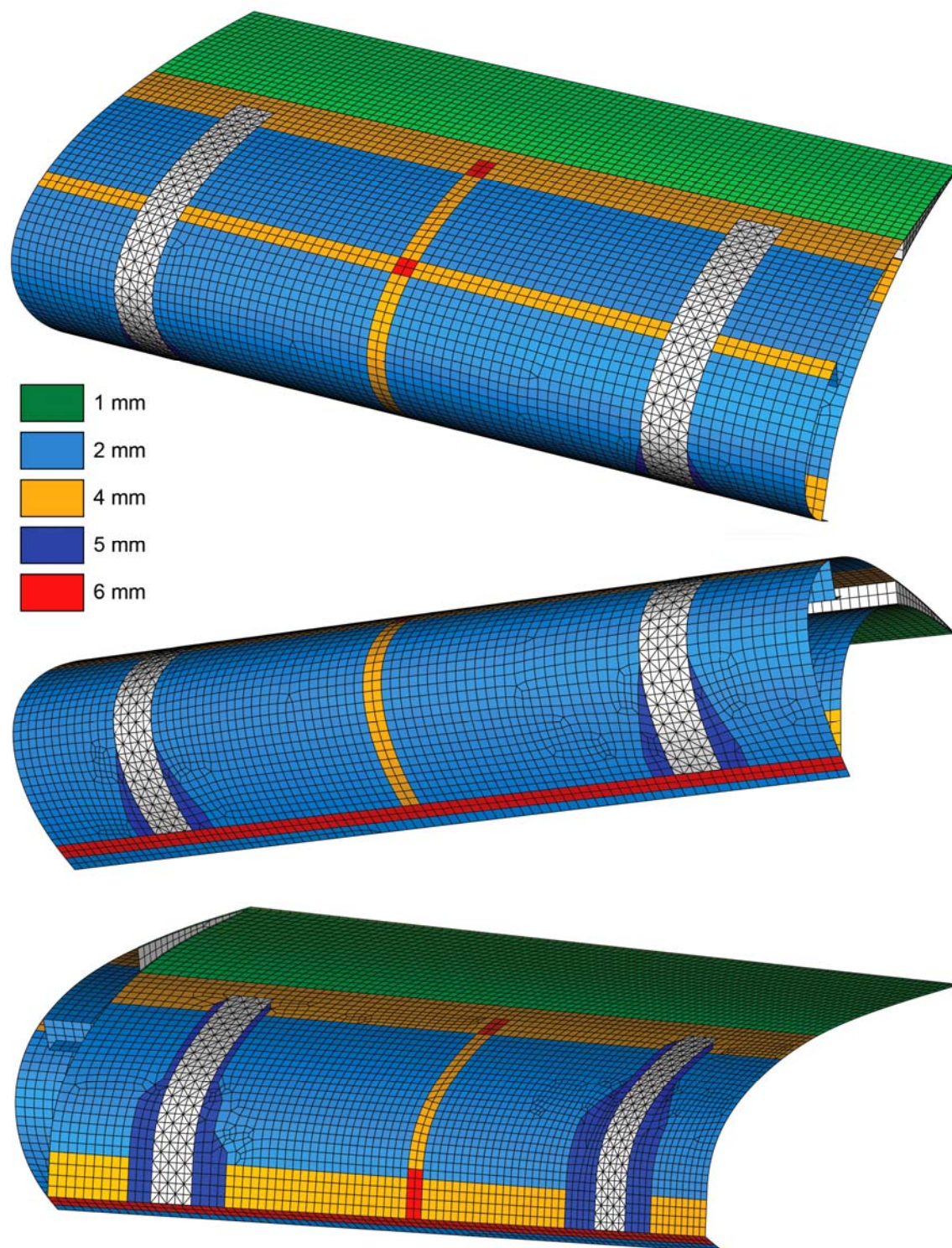


Slika 2.9. CAD model ljuskastog dijela konstrukcije



Slika 2.10. CAD model ljuskastog dijela konstrukcije bez gornje oplate

Promjenjive debljine lima i mjesta na kojima su limeni dijelovi spajani zakovicama i preklapaju se modelirani su naknadno dodijeljivanjem različitih debljina ljuskastim elemenatima. Na spojevima je debljina jednaka zbroju debljina limova koji se preklapaju (slika 2.11.).

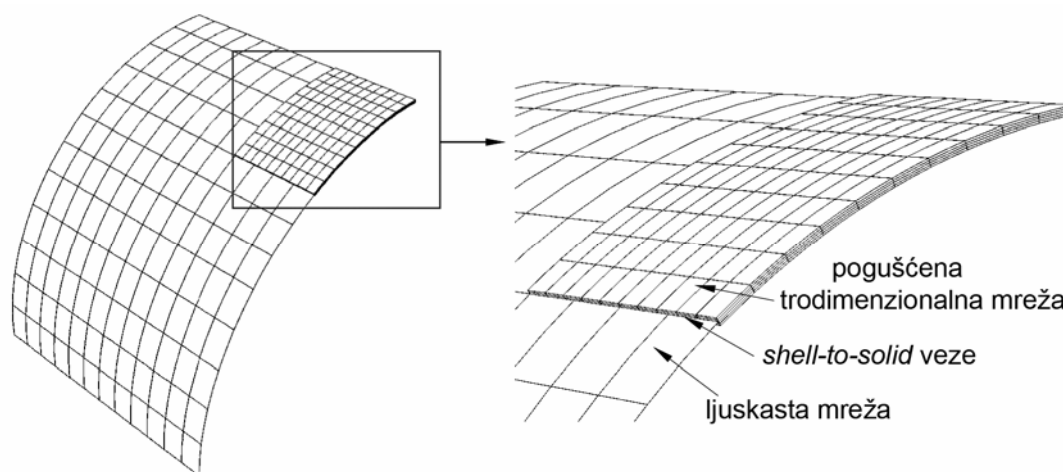


Slika 2.11. Različite debljine dodijeljene ljuskastim elementima

Zakovice nisu uzimane u obzir, iako je u Abaqus-u moguće definirati i spojeve kao što su zakovice, točkasti zavari i slično. Međutim, za takvu vrstu analize je potrebno napraviti bitno detaljniji model koji bi bio numerički znatno skuplji, ali i unio u problem dodatne nelinearnosti, zbog načina na koji se zakovice modeliraju.

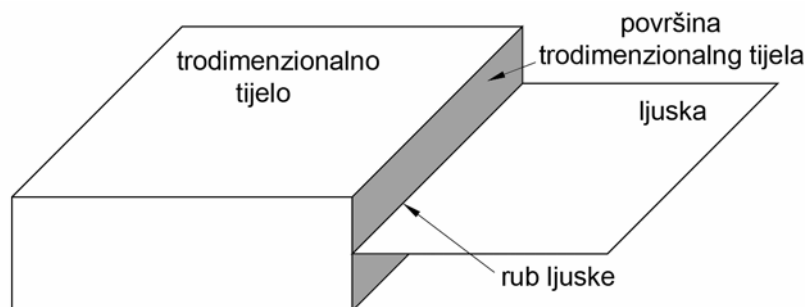
2.1.2 Povezivanje ljuskastih i trodimenzionalnih dijelova konstrukcije

Spajanje trodimenzionalnih elemenata rebara i dvodimenzionalnih elemenata korištenih za modeliranje oplata nije moguće kvalitetno izvesti jednostavnim spajanjem čvorova. Za takve namjene u Abaqus-u postoji posebna vrsta kinematičke veze koja se zove *shell-to-solid*, a služi isključivo za spajanje ljuskastih i trodimenzionalnih elemenata, a bazira se na povezivanju rubova ljuske koja se želi spojiti i odgovarajućih površina na trodimenzionalnim elementima.



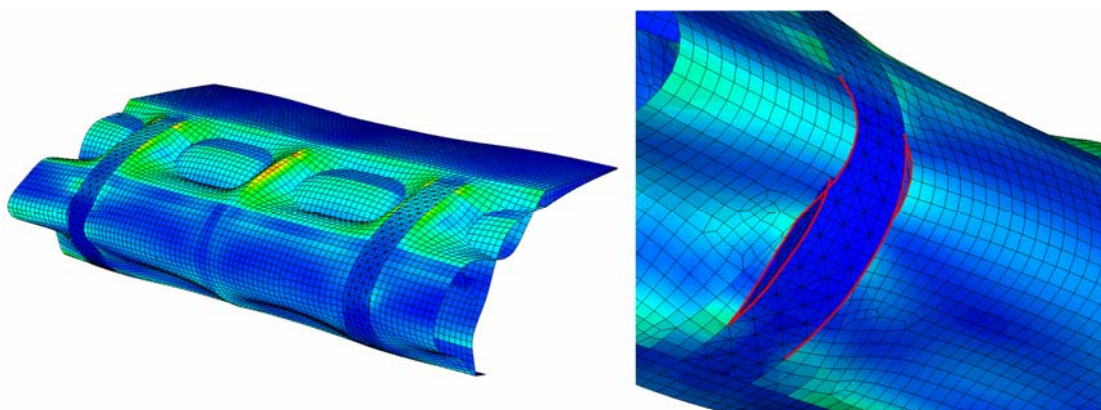
Slika 2.12. Primjer korištenja *shell-to-solid* veze [12]

Shell-to-solid se provodi stvaranjem unutarnjih distributivnih veza uvjeta između čvorova na ljusci i čvorova na površini trodimenzionalnog tijela. Uz pomoć zadanih ili automatski određenih udaljenosti i tolerancija se određuje koji čvorovi na rubovima će biti povezani s kojim čvorovima na površini. Za svaki čvor, koji se nalazi na odabranom rubu ljuske, se računaju jedinstvene veze. Čvorovi na ljusci su referentni čvorovi, a oni na trodimenzionalnom tijelu su spregnuti čvorovi. Svaka unutarnja veza preuzima sile i momente koji djeluju na čvoru ljuske i pretvara ih u sile koje djeluju na skupinu spregnutih čvorova, ostvarujući time ravnotežu. Razlog za primjenu *shell-to-solid* veza je nužnost izjednačavanja stupnjeva slobode, koji uključuju i rotacije, na spoju ovih dvaju različitih vrsta elemenata.



Slika 2.13. Ljuskasta površina i površina na trodimenzionalnom tijelu [12]

Korištenje kinematičkih veza može pojednostaviti i ubrzati posao modeliranja, ali je bitno i da te veze ispravno funkcioniraju. Jednostavan način utvrđivanja je provođenje neke brze statičke analize. Tako je u ovom slučaju korišteno tlačno ispitivanje, zadavanjem tlačnog opterećenja na vanjsku oplatu pretkrilca čime se otkrilo da *shell-to-solid* nije spojio sve zadane rubove i površine (slika 2.14.).



Slika 2.14. Prikaz tlačnog ispitivanja i nepovezanih čvorova uz faktor povećanja

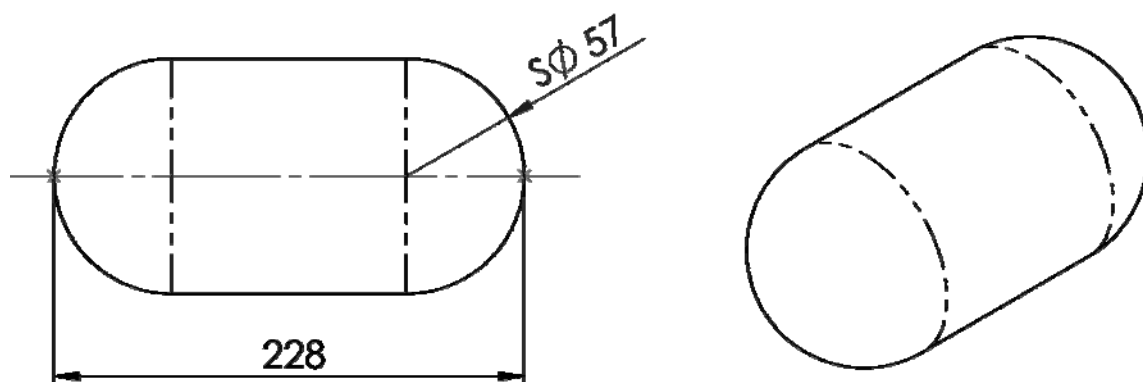
U tom slučaju problem je bio u poziciji ruba ljuske u odnosu na brid trodimenzionalnog rebra. Idealno bi bilo kada bi se rub ljuske spajao na čelo površine trodimenzionalnih elemenata, kao na slici 2.13. Tada su algoritmi u mogućnosti automatski obuhvatiti sve odabrane čvorove. Ovdje je ipak zbog drugih razloga trebalo napraviti model kod kojeg se rub ljuske poklapa s bridom rebra.

Na dijelu na kojem se čvorovi oba objekta relativno dobro poklapaju sprege su funkcionirale, no na dijelu gdje je veća zakrivljenost, a čvorovi se ne poklapaju, veze su izostale. Problem je riješen pomicanjem svih elemenata vanjske ljuske za 0.2 mm prema unutra, u smjeru suprotnom od normale na vanjsku površinu. Takav zahvat je

minimalno utjecao na ukupnu geometriju, pogotovo uzevši u obzir da je najčešća duljina stranice elementa dugačka otprilike 10 mm.

2.2 Udarač

Kod ispitivanja odziva konstrukcije na udar ptice u zrakoplovnoj industriji najčešće se, kao zamjena za pticu, koriste meki objekti napravljeni od neke vrste gela. Takvi se objekti *preljevaju* preko konstrukcije i zahvaćaju šire područje čime se smanjuje lokalna šteta od udara. Prema propisima FAR 25.571 se od konstrukcije putničkih zrakoplova traži da izdrže udare ptice od 1.82 kg (4 lb), tj. da uz oštećenja nastala prilikom takvog udara mogu sigurno nastaviti let. Stoga se najčešće ta masa upotrebljava za *zamjenske* ptice [4]. Uobičajen oblik udarača je cilindar promjera 114 mm i duljine 228 mm koji ima završetke oblika polukugle radijusa 57 mm (slika 2.15.).



Slika 2.15. Oblik udarača

Takav se oblik upotrebljava često u stvarnim ispitivanjima, a zbog usporedivosti podataka sa mjerenjima, isti se vrlo često upotrebljava i u numeričkim analizama.

3 Definiranje Materijala

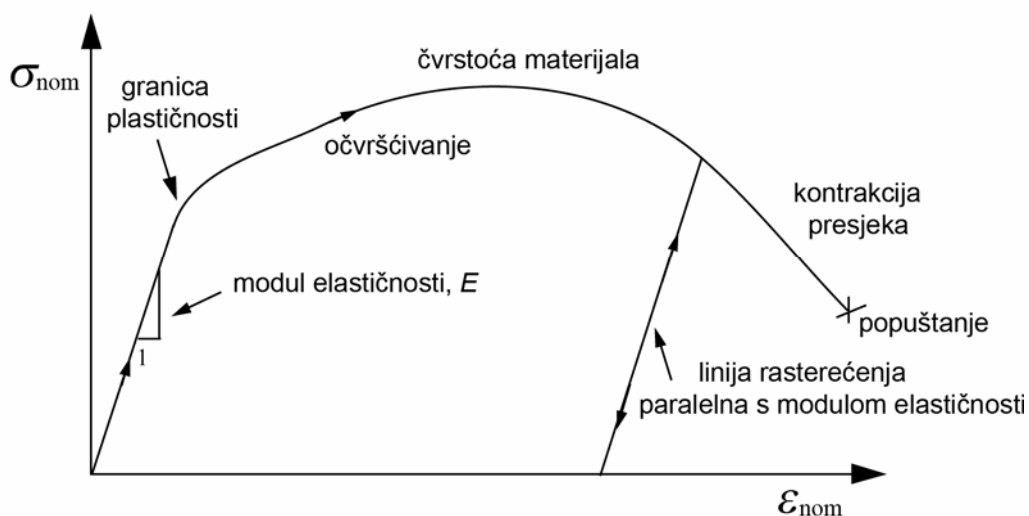
3.1 Definiranje metalnih materijala konstrukcije

Elastično ponašanje metala se zadaje jednostavno unošenjem modula elastičnosti (E) i Poissonovog koeficijenta (ν). No, s obzirom da se u ovim simulacijama želi dobiti plastični odziv konstrukcije, potrebno je definirati i svojstva materijala u plastičnom području.

Plastično ponašanje materijala se u Abaqus-u opisuje granicom popuštanja i plastičnim očvršćivanjem. Prijelaz iz elastičnog u plastično područje se događa na granici plastičnosti, poznatoj iz Hookeovog dijagrama. Naprezanja kod granice plastičnosti kod većine metala iznose 0,05 do 0,1% od vrijednosti modula elastičnosti. Granica plastičnosti je kod mekih čelika vrlo izražena, dok kod većine ostalih metala to nije slučaj. Stoga se, za materijale s kontinuiranom krivuljom u Hookeovom dijagramu, granicom plastičnosti smatra ono naprezanje pri kojem relativno produljenje doseže vrijednost 0,2% ($\sigma_{0,2}$).

Elastična naprezanja stvaraju samo elastične deformacije koje nestaju nakon rasterećenja i materijal se vraća u prvobitne dimenzije. No, kada naprezanja u materijalu pređu granicu plastičnosti pojavljuju se trajne (plastične) deformacije. Naprezanja koja odgovaraju plastičnim deformacijama se nazivaju plastičnim naprezanjima. Elastične i plastične deformacije se akumuliraju kada metal zađe u plastično područje.

Krutost metala se obično značajno smanji jednom kada se materijal počne plastično deformirati (slika 3.1.). Duktilni metal koji je zašao u plastično područje će povratiti svoju elastičnost nakon što se rastereti, ali će imati trajne deformacije, a te deformacije povećavaju granicu popuštanja za svako sljedeće opterećivanje. Ta se pojava zove očvršćivanje.



Slika 3.1. Hookeov dijagram [5]

Kod metala koji se plastično deformira pod vlačnim opterećenjem, prije nego što dođe do loma, može doći do lokaliziranih produljenja i stanjivanja, poznatog kao kontrakcija (slika 2.9.). Naprezanje s obzirom na prvobitni nedeformirani presjek je nominalno naprezanje koje se povezuje s nominalnim deformacijama (promjena u duljini u odnosu na nedeformiranu duljinu). Nominalno naprezanje u području kontrakcije je mnogo manje nego maksimalno naprezanje koje označava čvrstoću materijala. To se događa zbog geometrije ispitivane epruvete, prirode ispitivanja i načina mjerenja naprezanja i deformacija. Na primjer, ispitivanje istog materijala u tlačnom pokusu daje dijagram naprezanje-deformacija koji nema područje kontrakcije, zbog toga što se materijal ne može stanjivati pod utjecajem tlačnih naprezanja. Matematički model koji se koristi za opisivanje plastičnog ponašanja metala bi trebao biti u mogućnosti simulirati razlike u tlačnom i vlačnom području neovisno o geometriji ili vrsti opterećenja. To se može postići ako se poznate vrijednosti nominalnih naprezanja F/A_0 i nominalnih deformacija $\Delta l/l_0$, gdje indeks 0 predstavlja vrijednosti iz nedeformiranog stanja, zamijene s novim mjerama naprezanja i deformacija koje uzimaju u obzir promjenu presjeka tijekom konačnih deformacija.

3.1.1 Stvarne deformacije i naprezanja

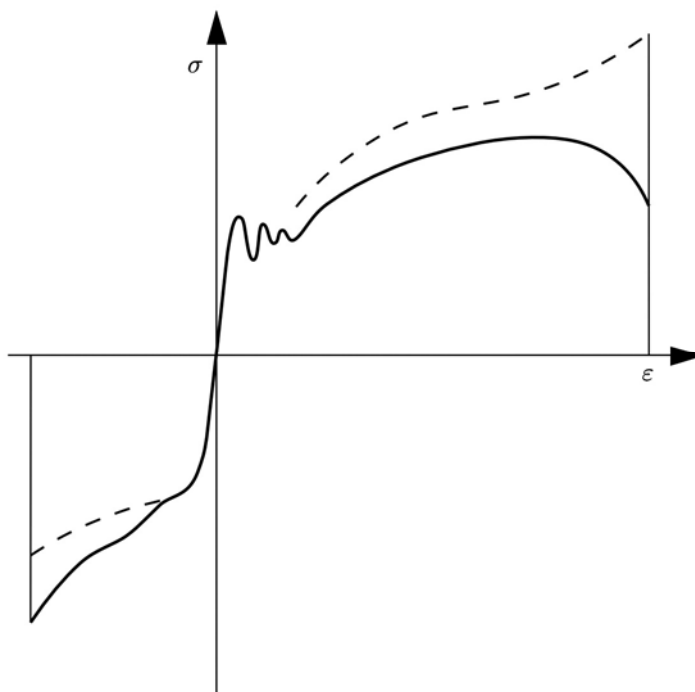
Deformacije kod tlačnih i vlačnih naprezanja su jednake samo uz pretpostavku da je $\Delta l \rightarrow dl \rightarrow 0$; tj.

$$d\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (1)$$

i

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right), \quad (2)$$

gdje je l trenutna duljina, l_0 početna duljina, a ε je *stvarna deformacija* ili *logaritamska deformacija*, a mjera naprezanja koja pripada stvarnoj deformaciji je *stvarno naprezanje*. Duktilni materijal podvrgnut plastičnim deformacijama ima jednak dijagram ovisnosti naprezanje-deformacija u tlačnom i u vlačnom području, ako se rezultati prikazuju u dijagramu sa stvarnim naprezanjima i deformacijama.



Slika 3.2. Kvalitativna usporedba između stvarnih i nominalnih odnosa naprezanja i deformacija kod čelika [6]

3.1.2 Definiranje plastičnosti u Abaqus-u

Prilikom definiranja trebaju se koristiti vrijednosti stvarnih naprezanja i stvarnih deformacija, da bi se ti podaci mogli ispravno interpretirati u Abaqus-u. Najčešće su vrijednosti u Hookeovom dijagramu nominalna naprezanja i nominalne deformacije. U tom slučaju se koriste sljedeći izrazi za pretvaranje nominalnih vrijednosti iz plastičnog područja u stvarne.

Veza između stvarne i nominalne deformacije je utvrđena izrazom

$$\varepsilon_{\text{nom}} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - \frac{l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (3)$$

Uređivanjem i logaritmiranjem obje strane tog izraza se dobiva

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (4)$$

Veza između stvarnih i nominalnih naprezanja se uspostavlja pod pretpostavkom da su i plastične i elastične deformacije nekompresibilne, tako da vrijedi

$$l_0 A_0 = l A. \quad (5)$$

Iz toga slijedi da se trenutna površina presjeka odnosi prema početnoj kao

$$A = A_0 \frac{l_0}{l} \quad (6)$$

Ubacivanjem tog izraza u formulu za stvarna naprezanja daje

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \frac{l}{l_0} = \sigma_{\text{nom}} \left(\frac{l}{l_0} \right) \quad (7)$$

gdje se

$$\frac{l}{l_0} \quad (8)$$

može zapisati i kao

$$1 + \varepsilon_{\text{nom}} \quad (9)$$

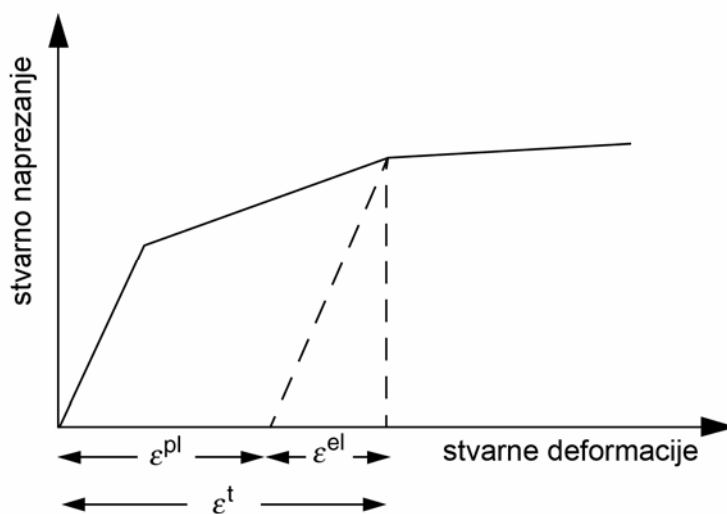
Tom zadnjom supstitucijom se dobiva konačni izraz za vezu između stvarnih naprezanja i nominalnih naprezanja i deformacija:

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}). \quad (10)$$

Klasični model plastičnosti metala u Abaqus-u dobro definira ponašanje većine metala u plastičnom području. Abaqus aproksimira glatku σ - ε krivulju realnog materijala nizom ravnih linija nastalih povezivanjem zadanih točaka. Krivulja može biti zadana bilo kojim brojem točaka, tako da je moguće zadati aproksimaciju vrlo blisku realnom materijalu. Podaci za plastičnost materijala definiraju stvarna plastična naprezanja kao funkciju stvarnih plastičnih deformacija. Prvo zadano naprezanje

definira granicu plastičnosti tako da je odgovarajuće plastično naprezanje jednako nuli.

Deformacije dobivene iz ispitivanja materijala nisu samo plastične deformacije te je stoga potrebno dobivene ukupne deformacije rastaviti na elastičnu i plastičnu komponentu. Plastično se naprezanje izračunava oduzimanjem elastične komponente, definirane kao vrijednost stvarnih naprezanja podijeljenih s modulom elastičnosti, od ukupnih deformacija (slika 3.3.).

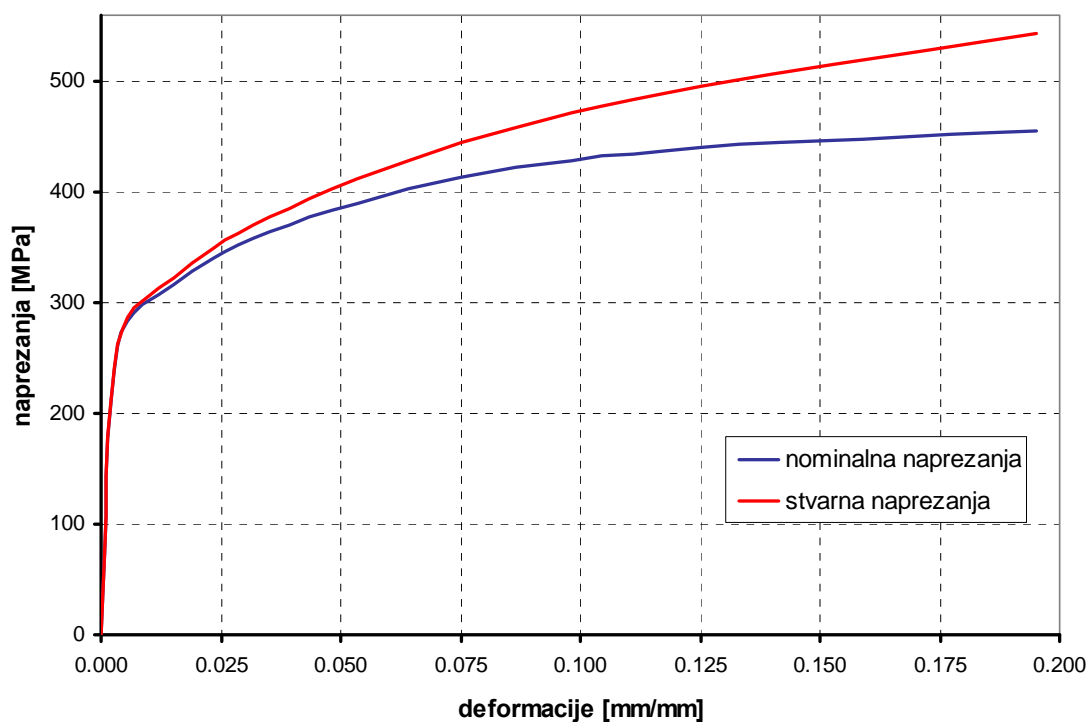


Slika 3.3. Rastavljanje ukupne deformacije na elastičnu i plastičnu komponentu

Taj se odnos zapisuje kao

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \sigma / E, \quad (11)$$

Dijagram na slici 3.4. prikazuje nominalne i stvarne vrijednosti plastičnih naprezanja za aluminijsku leguru 2024-T42 koja je osnovni materijal tankostijene konstrukcije korištene u ovom radu.



Slika 3.4. Usporedba nominalnih [7] i stvarnih naprezanja za aluminijску leguru 2024-T42

Osnovna svojstva svih materijala korištenih u analizi su dana u tablici 3.1. Za definiciju materijala sačaste konstrukcije je korišten idealno elastičan materijalni model, jer se smatralo da je taj dio dovoljno udaljen od područja interesa da se njegov utjecaj može zanemariti.

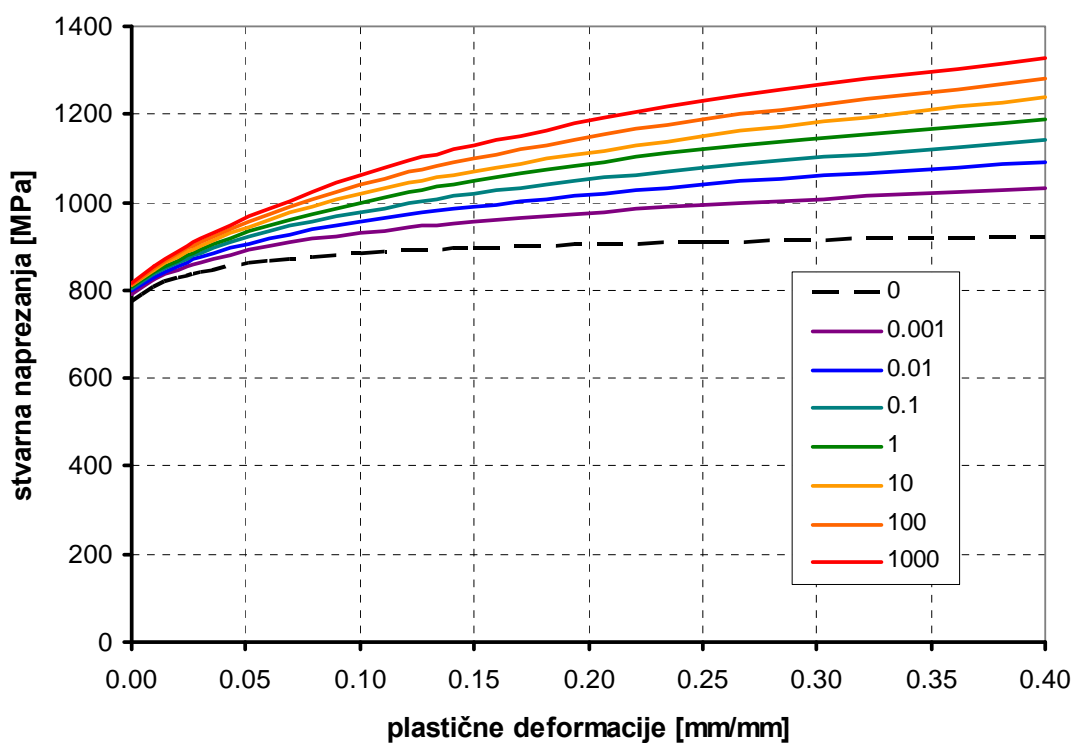
Tablica 3.1.. Mehanička svojstva materijala korištenih u modelu [7]

materijal	2024-T42	2024-T3	7010-T73651	1/8-5052-0015 [8]
primjena	oplata	izlazni brid	glavna rebra	sačasta ispuna
ρ [kg/m ³]	2780	2780	2820	97.7
E [GPa]	72.4	72.4	70.33	1.655*
ν	0.33	0.33	0.33	-
$\sigma_{0,2}$ [MPa]	262	290	427	-
σ_m [MPa]	455	427	496	-

* vrijedi samo za tlačno područje

3.1.3 Ovisnost plastičnih naprežanja o brzini deformiranja

Kod značajnih brzina deformacije, za precizno simuliranje ponašanja materijala, potrebno je definirati karakteristike plastičnog područja u ovisnosti o brzini deformiranja. Treba imati na umu da naprežanja plastičnih deformacija rastu s porastom brzine deformiranja (proces očvršćivanja). Taj efekt dolazi do izražaja, kod mnogih metala i polimera, kada brzine deformiranja narastu do između 0.1 i 1 s^{-1} , a može postati vrlo važan kada te brzine narastu do 10 pa i 100 s^{-1} . To se događa kod sudara pri velikim brzinama i u procesima proizvodnje prilikom oblikovanja deformiranjem.



Slika 3.5. Prikaz utjecaja brzine deformiranja [s^{-1}] na naprežanja u materijalu

Prilikom izrade ovoga rada nije bilo moguće doći do takvih podataka o materijalima od kojih je izrađena konstrukcija tako da su korištene samo veličine dobivene u statičkim ispitivanjima, mada u ovim analizama brzine plastičnih deformacija dostižu i 100 s^{-1} . Na dijagramu na slici 3.5. su prikazane krivulje ovisnosti plastičnih naprežanja o brzinama deformacija u rasponu od 0 do 1000 s^{-1} . Ti su podaci dobiveni iz primjera u sklopu Abaqus-ove dokumentacije, a odnose se na neimenovani čelik

visoke vlačne čvrstoće. U budućim analizama ovih problema, ove će promjene biti nužno uzeti u obzir, te ih usporediti s ovdje prikazanim rezultatima.

3.1.4 Kriterij popuštanja

U kombinaciji s definiranjem plastičnosti u Abaqus/Explicit-u se mogu koristiti i kriteriji popuštanja. Ovdje je izabran smični kriterij popuštanja koji najbolje odgovara lomu duktilnih metala, pogodan je za korištenje kod velikih brzina deformiranja, a kao mjeru za popuštanje koristi *ekvivalentne plastične deformacije*

$$\bar{\varepsilon}^{pl} = \bar{\varepsilon}^{pl}_0 + \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\mathbf{\varepsilon}}^{pl} : \dot{\mathbf{\varepsilon}}^{pl}} dt \quad (12)$$

gdje je $\bar{\varepsilon}^{pl}_0$ početna ekvivalentna plastična deformacija, koja je jednaka nuli ako drugačije nije zadano. Vrijednost ekvivalentnih plastičnih deformacija se promatra u integracijskim točkama konačnog elementa i pretpostavlja se da popuštanje nastupa kada parametar oštećenja poraste iznad 1. Parametar oštećenja je definiran kao

$$\omega = \frac{\bar{\varepsilon}^{pl}_0 + \sum \Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}}, \quad (13)$$

gdje je $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$ inkrement ekvivalentnih plastičnih deformacija, $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ je deformacija kod koje dolazi do loma, a sumacija se provodi u svim inkrementima analize. Kada su ispunjeni uvjeti popuštanja u svim točkama integracije u konačnom elementu sva se naprezanja u njemu poništavaju i on se isključuje iz analize. Takav element je i dalje dio mreže, ali se može izabrati njegovo neprikazivanje u vizualizaciji.

3.2 Definiranje materijala za udarač

Točnost predviđanja oštećenja ovisi u mnogome o prikladnom odabiru matematičkog modela za materijal ptice. U mnogim člancima na temu udara ptice u izložene dijelove zakoplova razni autori koriste različite definicije materijala, od idealno elastičnih [10] do materijalnih modela koji se temelje na jednadžbama stanja (*Equation of state - EoS*) [4].

HIPERELASTIČNI
MODEL

EOS MODEL

$t = 0 \text{ s}$

$t = 0.0005 \text{ s}$

$t = 0.001 \text{ s}$

$t = 0.0015 \text{ s}$

$t = 0.002 \text{ s}$

Slika 3.6. Usporedba materijalnih modela

Tokom izrade ovoga rada se također razmatralo više materijalnih modela, ponajprije hiperelastični i jednadžbe stanja. Izvedeno je i nekoliko probnih analiza. Na slici 3.6. je moguće vidjeti usporednu analizu hiperelastičnog modela i modela jednadžbe stanja (*EoS*) pri okomitom udaru u aluminijsku ploču brzinom od 100 m/s.

3.2.1 Definiranje hiperelastičnog materijala u Abaqus-u

Hiperelastični materijalni model je izotropan i nelinearan. Inače služi za opisivanje svojstava elastomera i sličnih materijala, koji imaju vrlo malu stlačivost (Poissonov koeficijent je jednak ili malo manji od 0.5). Numerička rješenja mogu biti vrlo osjetljiva na stupanj stlačivosti. Kada materijal nije potpuno geometrijski ograničen stupanj stlačivosti obično nije od presudne važnosti, što je slučaj i u ovom radu.

Mehanički odziv materijala se definira *potencijalom energije deformiranja* $U(\epsilon)$, koji opisuje energiju deformacije, *spremljene* u materijal, po jedinici volumena kao funkciju deformacije u toj točki materijala. U Abaqus-u se potencijal energije deformiranja zapisuje kao odvojene funkcije devijatorske i volumetrijske komponente; tj.

$$U = U_{\text{dev}}(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + U_{\text{vol}}(J_{el}). \quad (14)$$

Hiperelastični materijal je moguće definirati izravnim zadavanjem koeficijenata ili upisivanjem eksperimentalnih vrijednosti. Eksperimentalne vrijednosti se mogu dobiti pomoću četiri vrste ispitivanja;

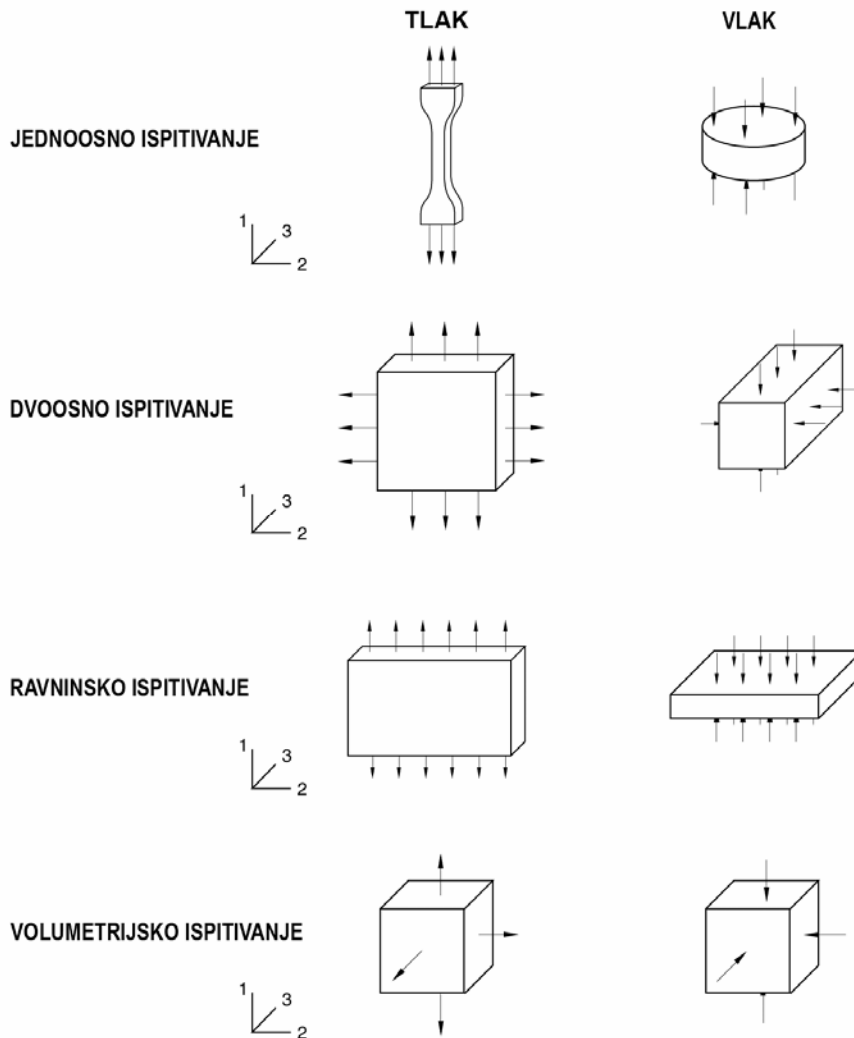
- jednoosnog
- dvoosnog
- ravninskog
- i, ako je materijal stlačiv, ispitivanja volumenske stlačivosti (slika 3.7.).

Koeficijenti se dalje automatski računaju pomoću metode najmanjih kvadrata. Općenito je najbolje zadati podatke iz više vrsta ispitivanja koja pokrivaju i raspon deformacija koje bi se trebale pojaviti u simulaciji. To posebno vrijedi za fenomenološke forme zapisa potencijala, kao što je Ogden, koja je i korištena ovom prilikom. Ogdenov zapis potencijala energije deformiranja glasi

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2G_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i}, \quad (15)$$

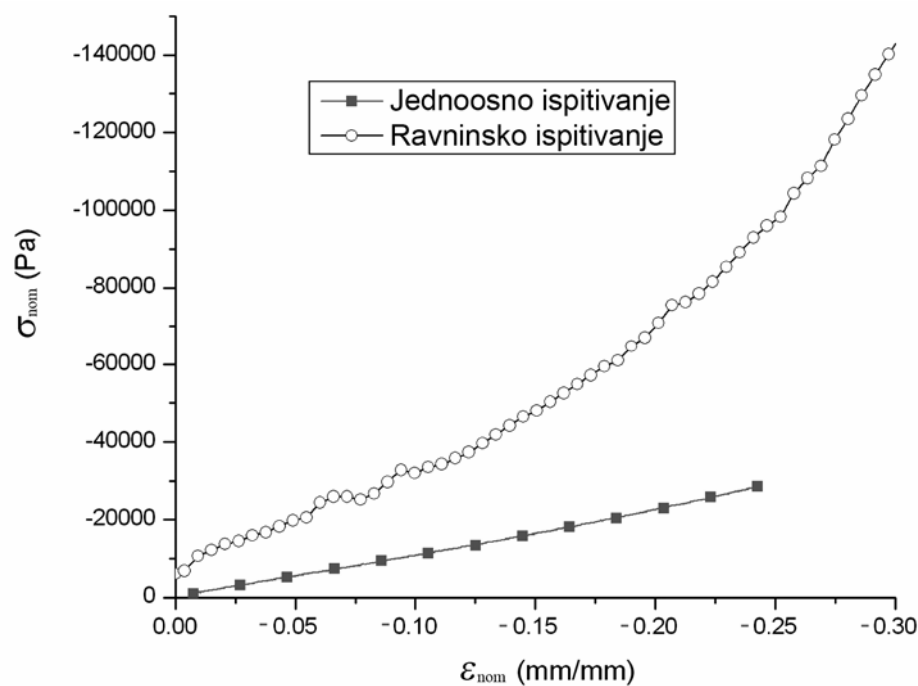
gdje su $\bar{\lambda}_i$ glavne devijatorske deformacije $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$; λ_i su glavne deformacije; N je parametar materijala; a G_i , α_i , i D su parametri materijala ovisni o temperaturi. Početni modul smicanja i volumenski modul elastičnosti za Ogdenov model su zadani prema

$$G_0 = \sum_{i=1}^N \mu_i, \quad K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (16)$$



Slika 3.7. Vrste ispitivanja koje se mogu koristiti za definiranje hiperelastičnog materijalnog modela [12]

Rezultati jednoosnih i ravninskih tlačnih ispitivanja za balistički gel su preuzeti iz [11] (slika 3.8.).



Slika 3.8. Rezultati jednoosnog i ravninskog tlačnog ispitivanja balističkog gela [11]

Zbog male vlačne čvrstoće gela su izvođena samo tlačna ispitivanja, ali za hiperelastični materijal nisu definirani kriteriji popuštanja, jer to nije ni moguće napraviti za takav materijalni model.

4 Analiza

4.1 Nelinearna analiza

Mijenjanje krutosti konstrukcije tijekom deformacija predstavlja nelinearni problem, a sve realne konstrukcije su nelinearne. Linearna analiza je dobra aproksimacija koja pomaže kod rješavanja mnogih problema, ali je ipak neprikladna za neke vrste analiza koje uključuju proizvodne procese, kao što su kovanje ili prešanje, analiziranje gumenih i sličnih komponenti i analize sudara s plastičnim deformiranjem.

Budući da u nelinearnoj analizi krutost ovisi o pomacima, početna elastičnost se više ne može jednostavno množiti sa opterećenjima, da bi se dobili pomaci. U nelinearnoj implicitnoj analizi se matrica krutosti mora mnogo puta sastaviti i invertirati tijekom analize, što je procesorski bitno zahtjevnije za rješavanje od linearnih analiza. Obzirom da odziv nelinearnih sustava nije linearna funkcija opterećenja, nije moguće dobivanje rješenja superpozicijom više slučajeva opterećenja.

Tri su moguća izvora nelinearnosti:

- nelinearnost materijala
- nelinearnost rubnih uvjeta
- geometrijska nelinearnost

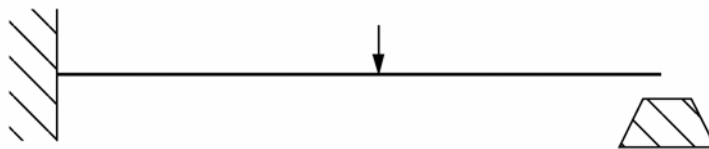
4.1.1 Materijalna nelinearnost

Ove vrste nelinearnosti su već raspravljene u poglavlju o materijalima. Metali imaju linearan odziv u elastičnom području, a nelinearan u plastičnom području gdje nastaju nepovratne deformacije, dok elastomeri i slični materijali imaju nelinearan odziv u elastičnom području.

Izvori nelinearnosti materijala ne moraju biti samo u vezi s deformacijama. Ovisnost naprezanja o brzini deformacije i popuštanje materijala su također oblici nelinearnosti, kao i svojstva materijala koje su ovisne o temperaturi ili nekim drugi zadanim parametrima.

4.1.2 Nelinearnost rubnih uvjeta

Do nelinearnosti rubnih uvjeta dolazi ako se oni mijenjaju tokom analize. Primjer za to bi bila greda koja se savija pod opterećenjem dok ne naiđe na prepreku.

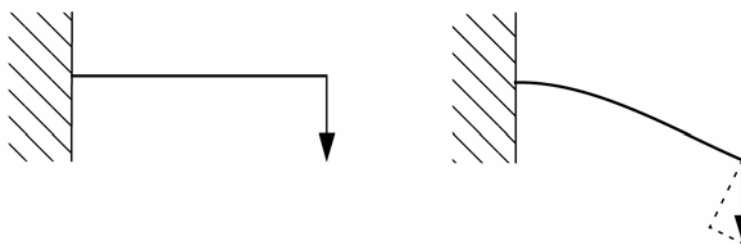


Slika 4.1. Greda koja nailazi na prepreku

Prije dodira s preprekom, pomak vrha grede linearno ovisi o opterećenju (za male pomake). Nakon dodira dolazi do naglih promjena u rubnim uvjetima koji sprečavaju daljnje pomake vrha grede. Nelinearnosti rubnih uvjeta stvaraju velike diskontinuitete, jer kada se dogodi kontakt, dolazi do trenutnih i velikih promjena u odzivu konstrukcije.

4.1.3 Geometrijska nelinearnost

Geometrijske nelinearnosti se pojavljuju kada veličina deformacija počne utjecati na odziv konstrukcije. Koristeći ponovo primjer uklještene grede može se vidjeti da se kod velikih pomaka vrha oblik znatno mijenja.



Slika 4.2. Velike deformacije uklještene grede

Uz to, kod velikih otklona vrha, više se ne može pretpostaviti da sila djeluje samo okomito na gredu nego se mora rastavljati na komponentu koja djeluje duž grede i onu koja djeluje okomito na nju.

4.2 Nelinearna eksplisitna analiza

Programski paket Abaqus nudi dvije metode za provođenje nelinearnih dinamičkih analiza; implicitnu i explicitnu. U ovom slučaju je procijenjeno da bi za rješavanje

zadanog problema eksplicitna metoda bolje odgovarala. Eksplicitna metoda je i razvijena u svrhu analiziranja brzih i kratkih događaja, a pogodna je i za rješavanje problema koji uključuju kompleksne kontakte i udarna opterećenja, oblikovanje deformiranjem, materijal koji degradira i oštećuje se, i sl.

Eksplicitna metoda koristi metodu središnjih diferencija za integriranje jednadžbi gibanja po vremenu, s kinematički uvjeti u jednom vremenskom koraku se računju uz pomoć kinematičkih uvijeta iz prethodnog koraka. Na početku inkrementa se rješavaju jednadžbe dinamičke ravnoteže prema kojima je čvorna matrica mase, \mathbf{M} , pomnožena s čvornim ubrzanjima, $\ddot{\mathbf{u}}$, jednaka razlici vanjskih i unutrašnjih sila.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I} \quad (17)$$

Vrijeme potrebno za računanje jednog koraka je relativno kratko jer se koristi dijagonalna matrica mase koja se lako invertira. Takva matrica pretpostavlja je masa elementa jednoliko raspoređena po čvorovima zbog čega vrijedi da su ubrzanja čvorova određena samo masom čvorova i silom koja djeluje na njih.

Brzine se računaju integriranjem ubrzanja po vremenu, metodom središnjih diferencija uz pretpostavku, uz pretpostavku da su ubrzanja konstantna. Pribrajanjem te promjene brzine brzini iz sredine predhodnog koraka se računa brzina u sredini trenutnog koraka:

$$\dot{\mathbf{u}}\Big|_{\left(t+\frac{\Delta t}{2}\right)} = \dot{\mathbf{u}}\Big|_{\left(t-\frac{\Delta t}{2}\right)} + \frac{\left(\Delta t\Big|_{(t+\Delta t)} + \Delta t\Big|_{(t)}\right)}{2} \ddot{\mathbf{u}}\Big|_{(t)} \quad (18)$$

Rezultat integriranja tih brzina se pribraja pomacima čvorova s početka koraka čime se dobivaju pomaci na kraju koraka:

$$\mathbf{u}_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}\Big|_{(t)} + \Delta t\Big|_{(t+\Delta t)} \dot{\mathbf{u}}\Big|_{(t+\Delta t)} \quad (19)$$

Zadovoljavanjem ravnoteže na početku koraka se određuju ubzanja. Poznavajući ubrzanja, brzine i pomaci mogu eksplicitno napredovati kroz vrijeme. Izraz *eksplicitno* se odnosi na činjenicu da je stanje na kraju koraka poznato isključivo na temelju ubrzanja, brzina i pomaka na početku koraka. Da bi takva metoda pružila točne rezultate, vrijeme koraka mora biti vrlo malo, kako bi ubrzanja bila približno konstantna u cijelom koraku. Zbog tako, vremenski, kratkog koraka za prosječnu analizu je potrebno više tisuća koraka, što nije problem, budući da ih se brzo može

izračunati. Maksimalno vrijeme koraka određuje granica stabilnosti, koja je najvažniji faktor za preciznost eksplicitne analize. Ako to vrijeme prijeđe granicu stabilnosti u analizi se mogu pojaviti numeričke nestabilnosti. Vrijednost najvećeg stabilnog vremenskog koraka se definira prema najvećoj vlastitoj frekvenciji sustava konačnih elemenata.

$$\Delta t|_{\text{stabilni}} = \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (20)$$

za sustav bez prigušenja, odnosno

$$\Delta t|_{\text{stabilni}} = \frac{2}{\omega_{\max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi) \quad (21)$$

za sustav s prigušenjem, gdje je ξ koeficijent prigušenja moda najviše frekvencije. Abaqus/Explicit uvijek u analizu unosi malo prigušenje u obliku *volumne viskoznosti* radi kontroliranja visokofrekventnih oscilacija

S obzirom da je računanje točne vrijednosti najviše frekvencije sustava komplicirano i neisplativo, koristi se pojednostavljena procjena:

$$\Delta t_{\text{stabilni}} = \frac{L^e}{c_d} \quad (22)$$

gdje je L^e najmanja duljina elementa, a c_d valna brzina u elementu, koja se definira kao

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (23)$$

Iz navedenih izraza je vidljivo da smanjivanje elemenata i povećanje modula elastičnosti smanjuju vrijeme maksimalnog vremenskog koraka. Granica stabilnosti se automatski određuje i vrijeme koraka joj se prilagođava tokom cijele analize, no ako je potrebno, moguće je i ručno definirati nepromjenjivi vremenski korak.

4.3 Početni uvjeti

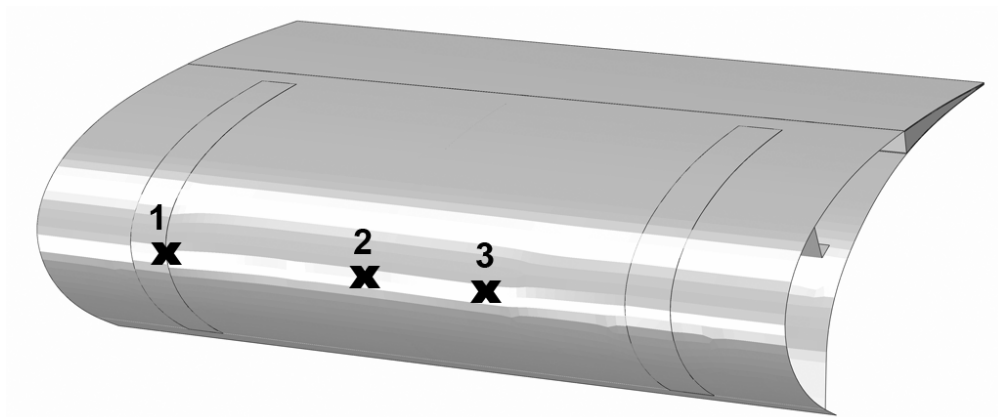
Budući da je najveća mogućnost naleta zrakoplova na pticu na manjim visinama, a veći putnički zrakoplovi najčešće izbjegavaju let na tim visinama pretpostavljeno je da će se sudar dogoditi prilikom polijetanja ili slijetanja.

Brzina sudara je procijenjena na 100 m/s (≈ 200 KIAS), što je i više od brzine koju takvi zrakoplovi ostvaruju u fazama polijetanja i slijetanja.

S obzirom da je pretkrilce dio napadnog ruba krila, trebalo je odrediti kut udara koji je u skladu s geometrijom krila. Zbog blizine mjesta udara korjenu krila uzeto je da je postavni kut profila krila na mjestu udara jednak postavnom kutu korjenskog profila koji je jednak 0° . Kut strijele napadnog ruba je jednak 27.9° .

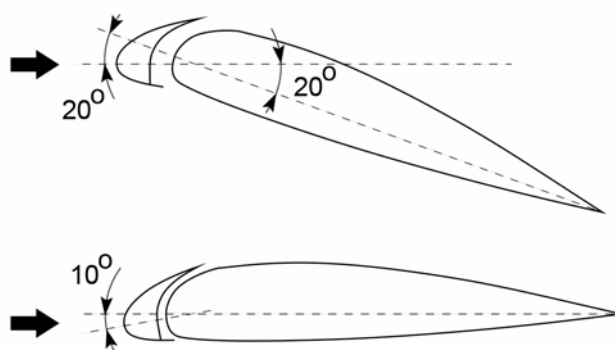
Odabrana su tri mjesta udara na pretkrilcu;

- 1) na glavnom rebu u spoj ljuskastih i trodimenzionalnih elemenata,
- 2) u središnje pomoćno rebro,
- 3) između pomoćnog i glavnog rebra.



Slika 4.3. Tri mjesta udara na modelu

Osim različitih mjesta udara odabrana su i dva slučaja stupnja izvučenosti pretkrilca s napadnim kutem zrakoplova. Jedan slučaj je kada su pretkrilca izvučena za 20° , ali je i napadni kut zrakoplova jednak 20° što daje kut udara od 0° . Druga je situacija kada zrakoplov s nulnim napadnim kutem, ali još uvijek ima pretkrilce izvučeno za 10° , što rezultira kutem udara u vertikalnoj ravnini od 10° .



Slika 4.4. Napadni kutevi udara

Isto je tako određeno da udarač pogađa tjeme profila, tako da se simulira najgori slučaj sa ranije zadanim parametrima.

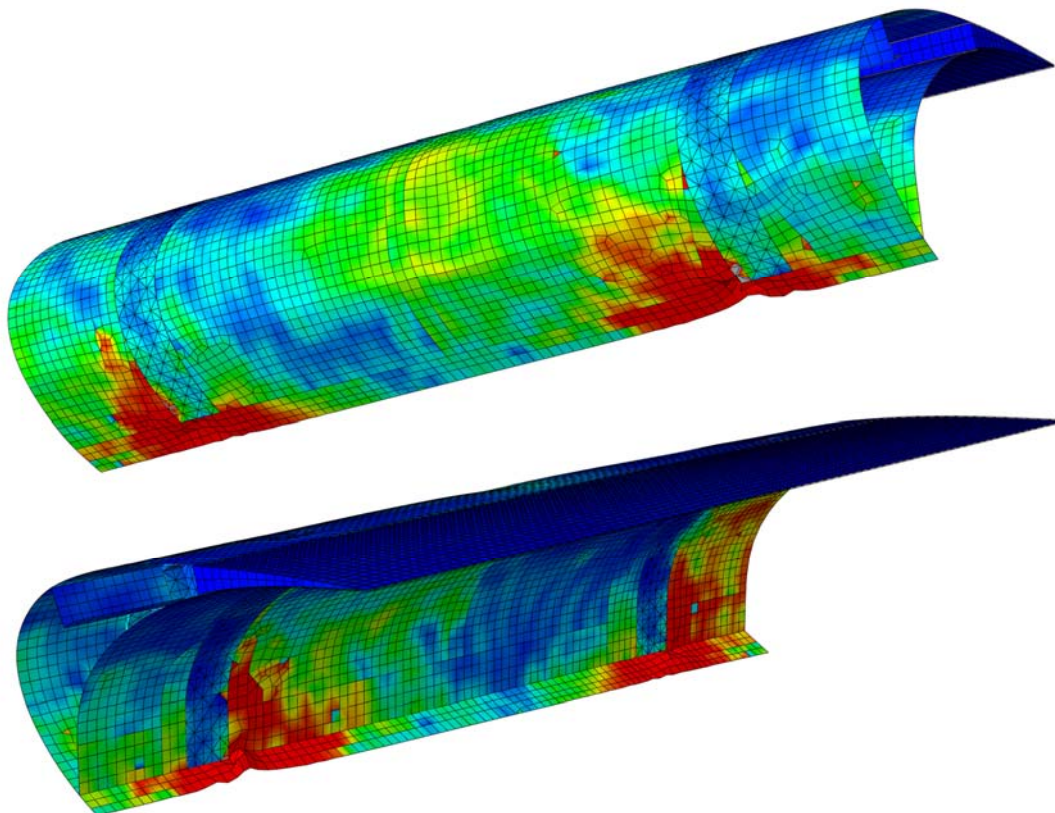
Ukupno je, kombinacijom ovih parametara, dobiveno šest slučajeva udara, a za svaki od njih je analizirano 0.005 s od trenutka udara.

- **Slučaj 1** – mjesto udara 1, verikalni kut 0°
- **Slučaj 2** – mjesto udara 1, verikalni kut 10°
- **Slučaj 3** – mjesto udara 2, verikalni kut 0°
- **Slučaj 4** – mjesto udara 2, verikalni kut 10°
- **Slučaj 5** – mjesto udara 3, verikalni kut 0°
- **Slučaj 6** – mjesto udara 3, verikalni kut 10°

4.4 Rezultati

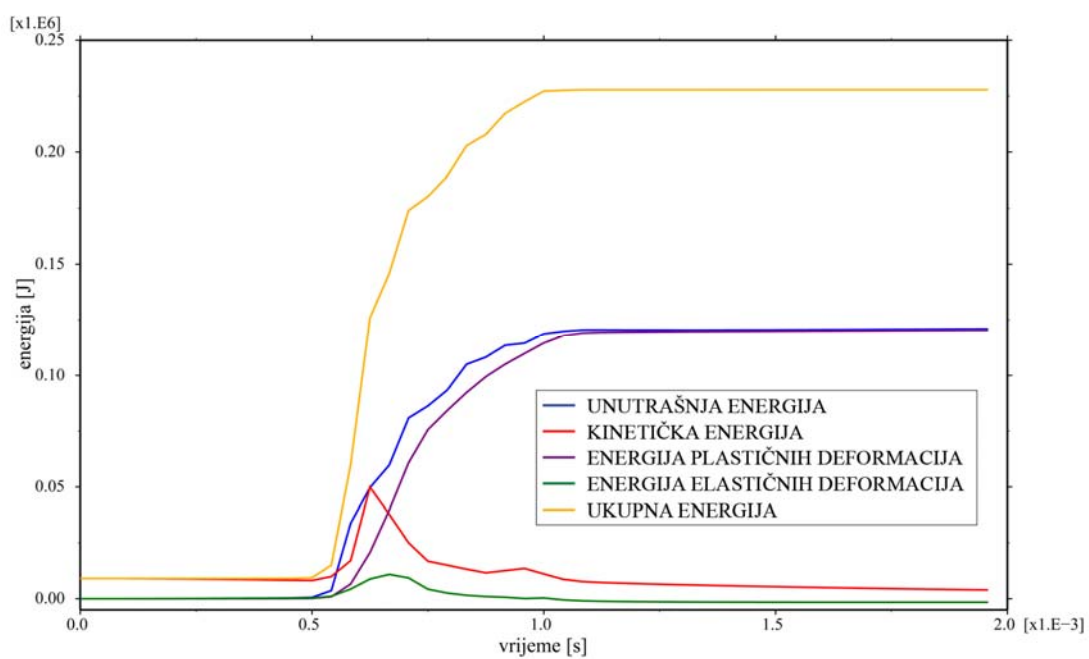
4.4.1 Numeričke nestabilnosti u analizi

Tokom mnogobrojnih izvođenja dinamičkih analiza, u svrhu izrade ovog rada, došlo se do zaključka da kinematičke veze imaju velik utjecaj na stabilnost simulacija. Tako je zadavanje *shell-to-solid* veza na neki neodgovarajući način prouzrokovalo dobivanje neupotrebljivih rezultata. To se najlakše vidi na potpuno nelogičnim pojavama velikih naprezanja i deformacija daleko od mjesta udara.



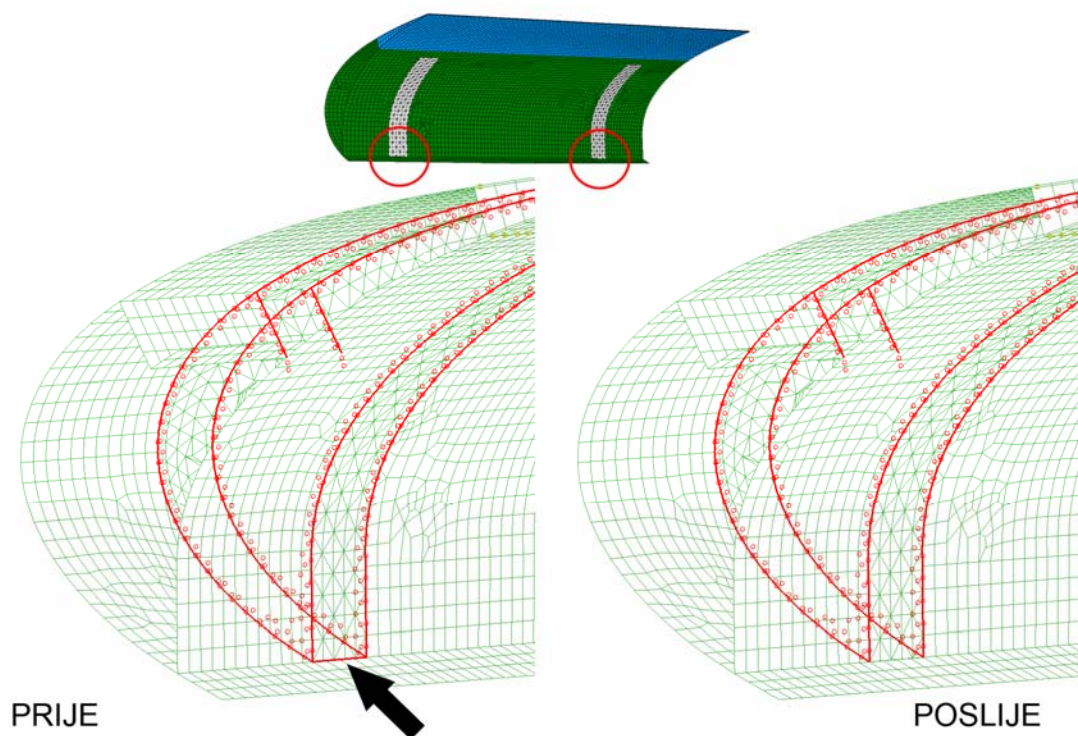
Slika 4.5. Utjecaj numeričkih nestabilnosti na naprezanja i deformacije

Prateći vrijednosti energija u cijelom sustavu, lako se može vidjeti da se simulacija izvodi dobro do jednog trenutka kada ukupna energija sustava naglo poraste i ostane na visokoj razini.



Slika 4.6. Prikaz nestabilnosti u dijagramu energija

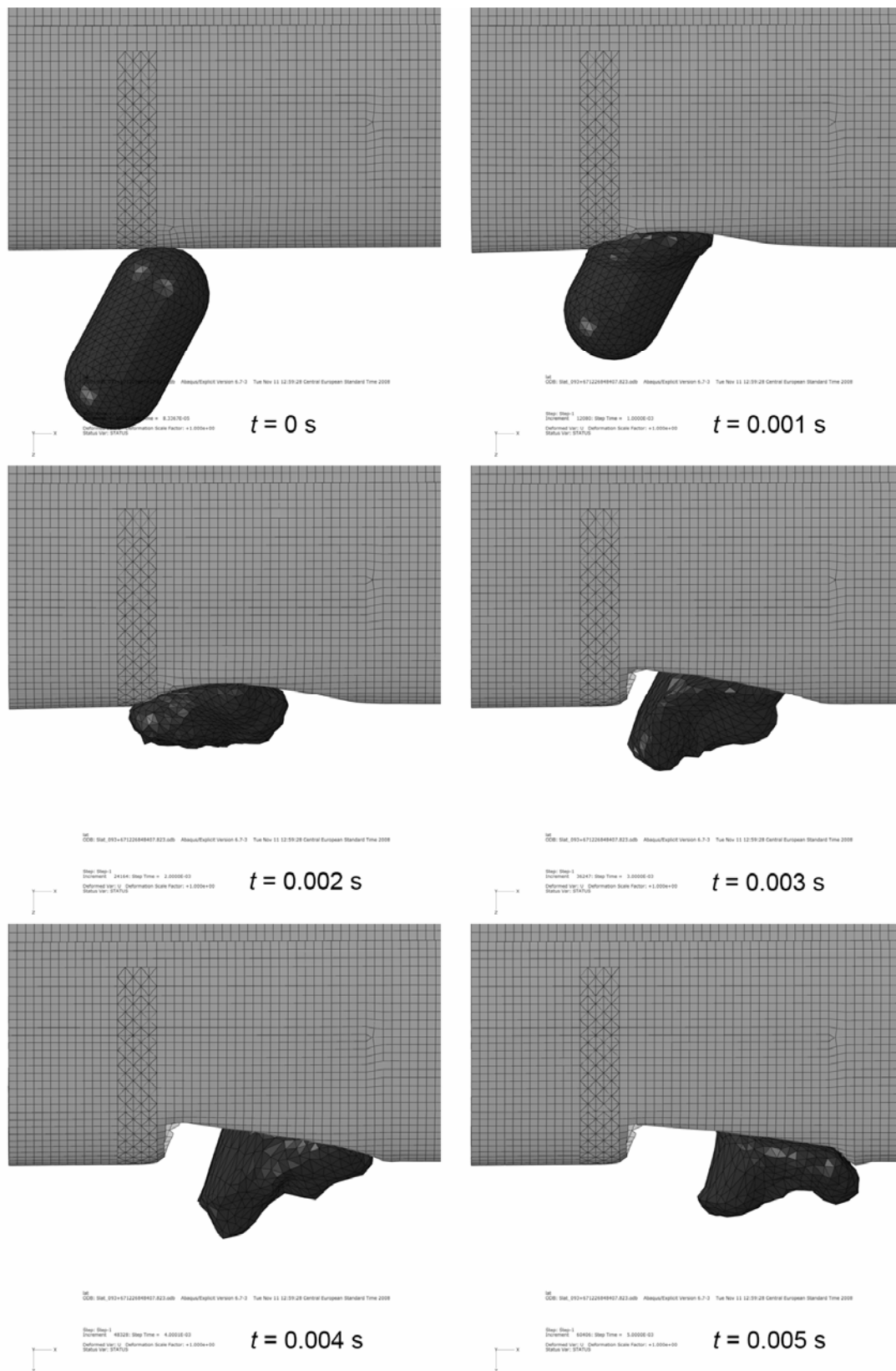
U takvim slučajevima je moguće popraviti stabilnost isključivanjem automatske kontrole promjenjivog vremenskog inkrementa i njegovim *ručnim* podešavanjem na konstantnu vrijednost, nižu za red veličine (ili još i manje). No time se može i bitno povećati vrijeme izvođenja analize, a i dalje ostaje osjetljivost na bilo kakve druge promjene parametara.



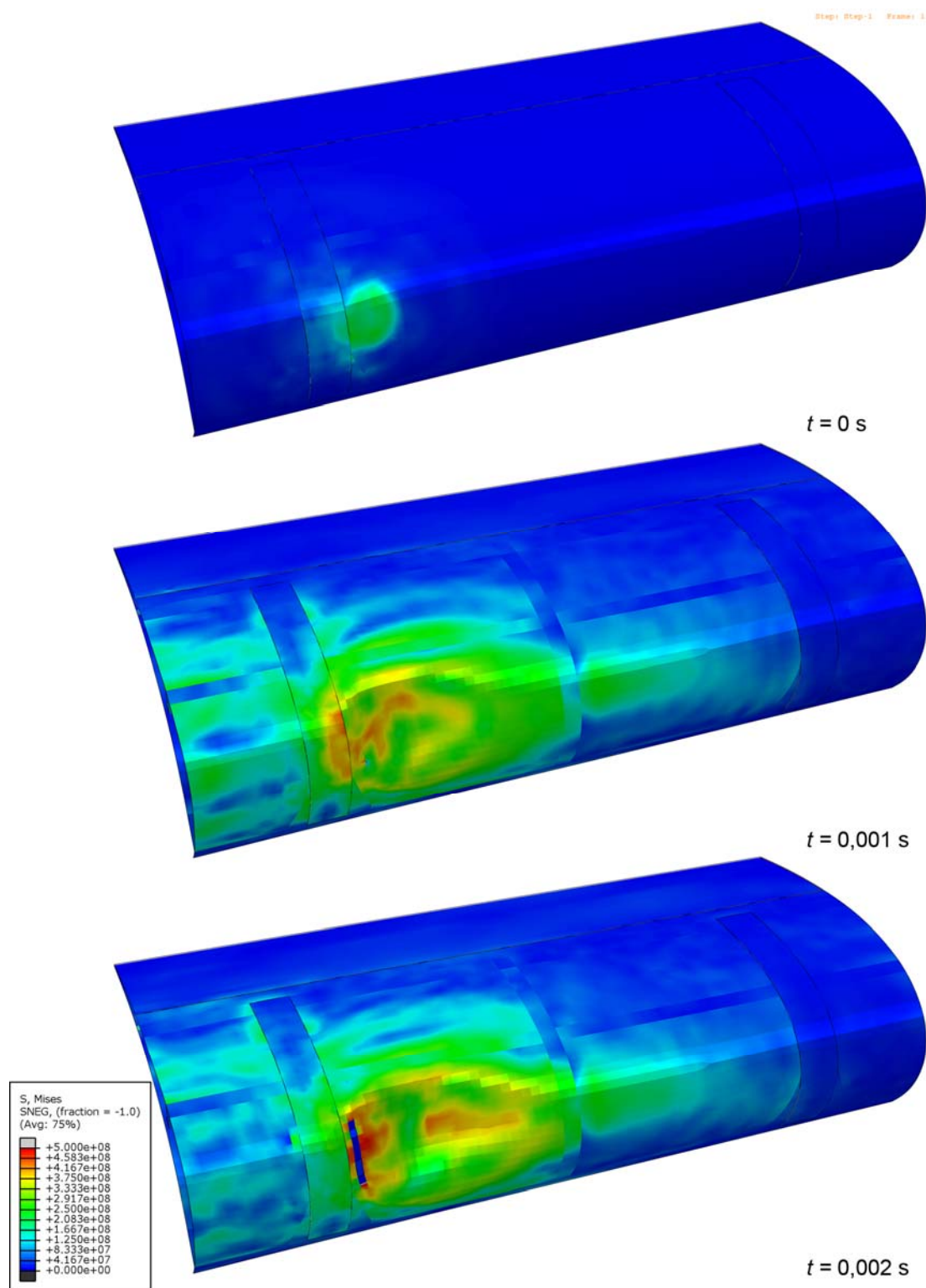
Slika 4.7. Prikaz rubova isključenih iz kinematskih veza

U ovom slučaju je problem riješen isključivanjem nekih bridova iz kinematskih veza (slika 4.7.). To isključivanje je imalo mali utjecaj na model budući da je na tom dijelu debljina ljuske najveća pa, na tom mjestu, nije došlo do bitnih deformacija.

4.4.2 Slučaj 1

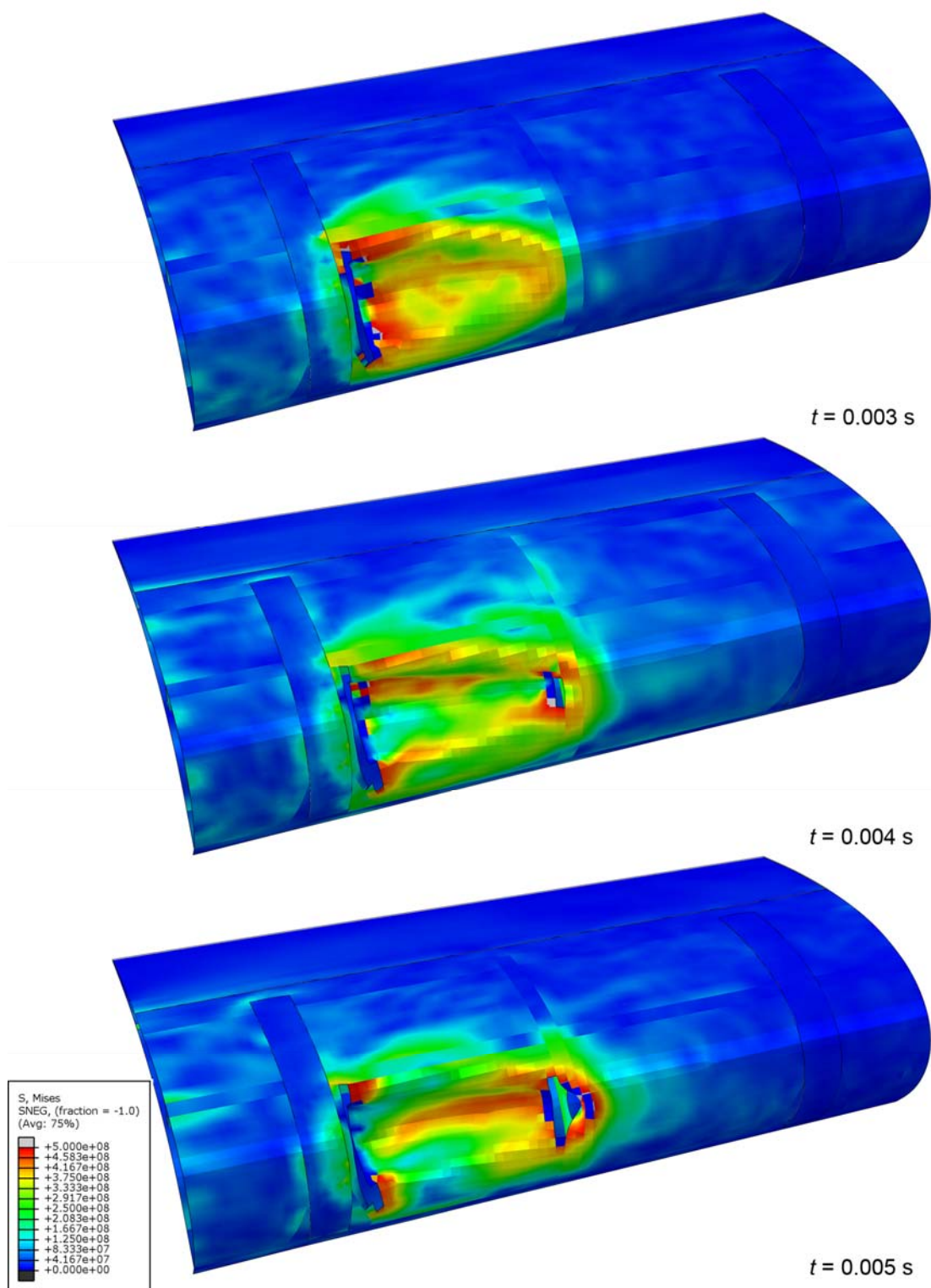


Slika 4.8. Ortogonalni prikaz udara za slučaj 1 (s gornje strane)

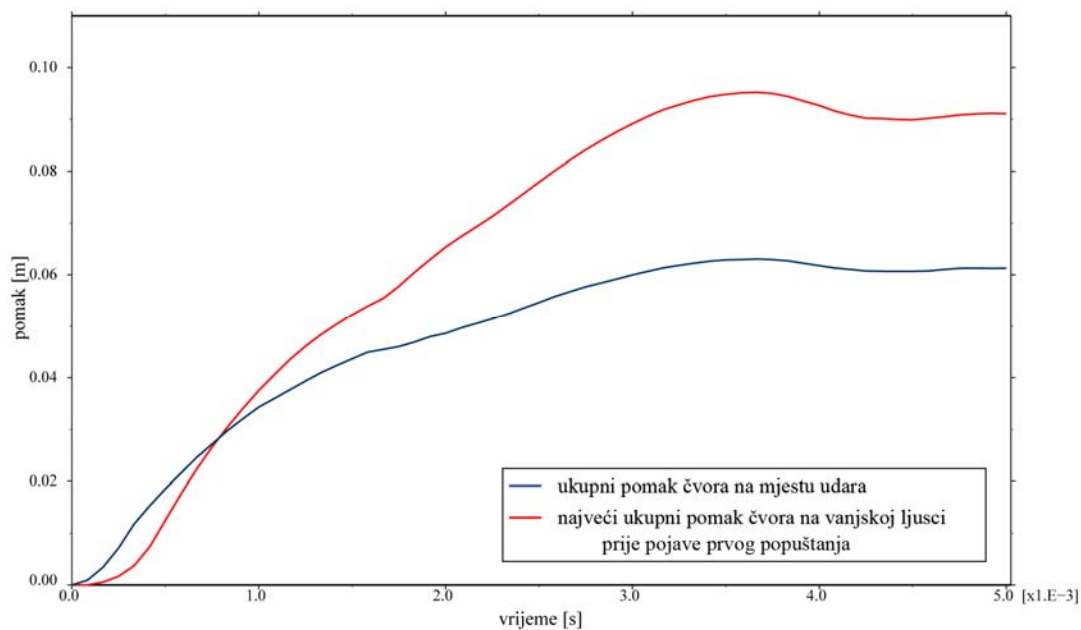


Slika 4.9. Naprezanja po von Misesu za slučaj 1 (0-0.002 s)

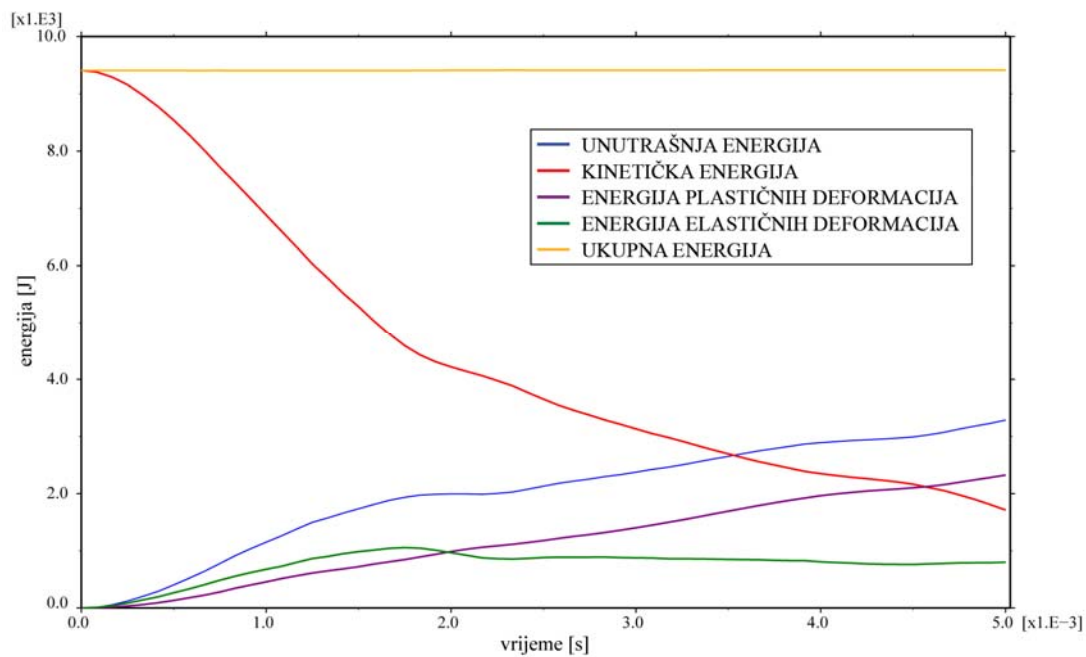
U prvom slučaju do prvog popuštanja dolazi 2 ms nakon kontakta. Prva pukotina se pojavljuje uz glavno rebro a zatim se stvara još jedna uz pomoćno rebro.



Slika 4.10. Naprezanja po von Misesu za slučaj 1 (0.003-0.005 s)

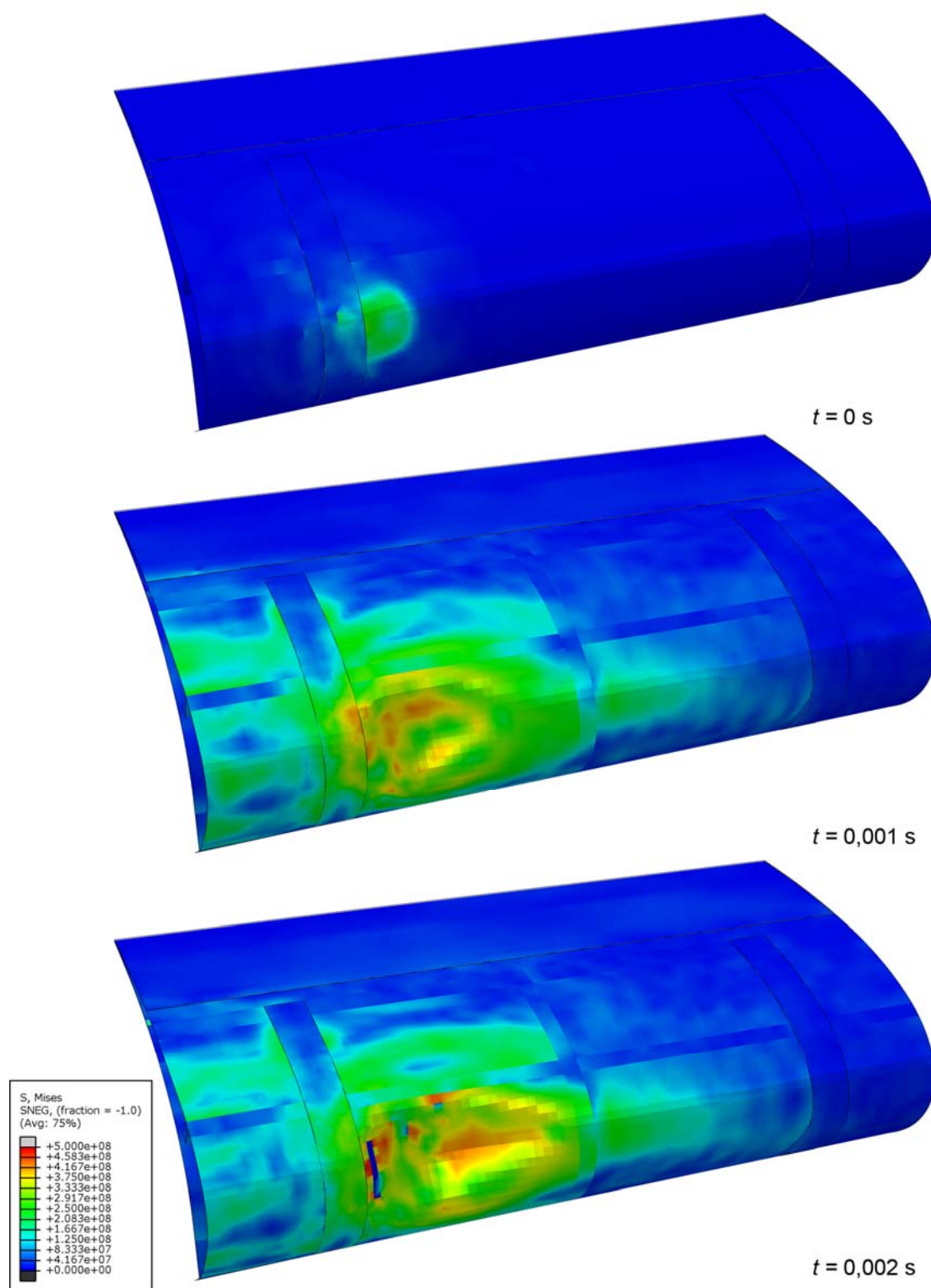


Slika 4.11. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 1



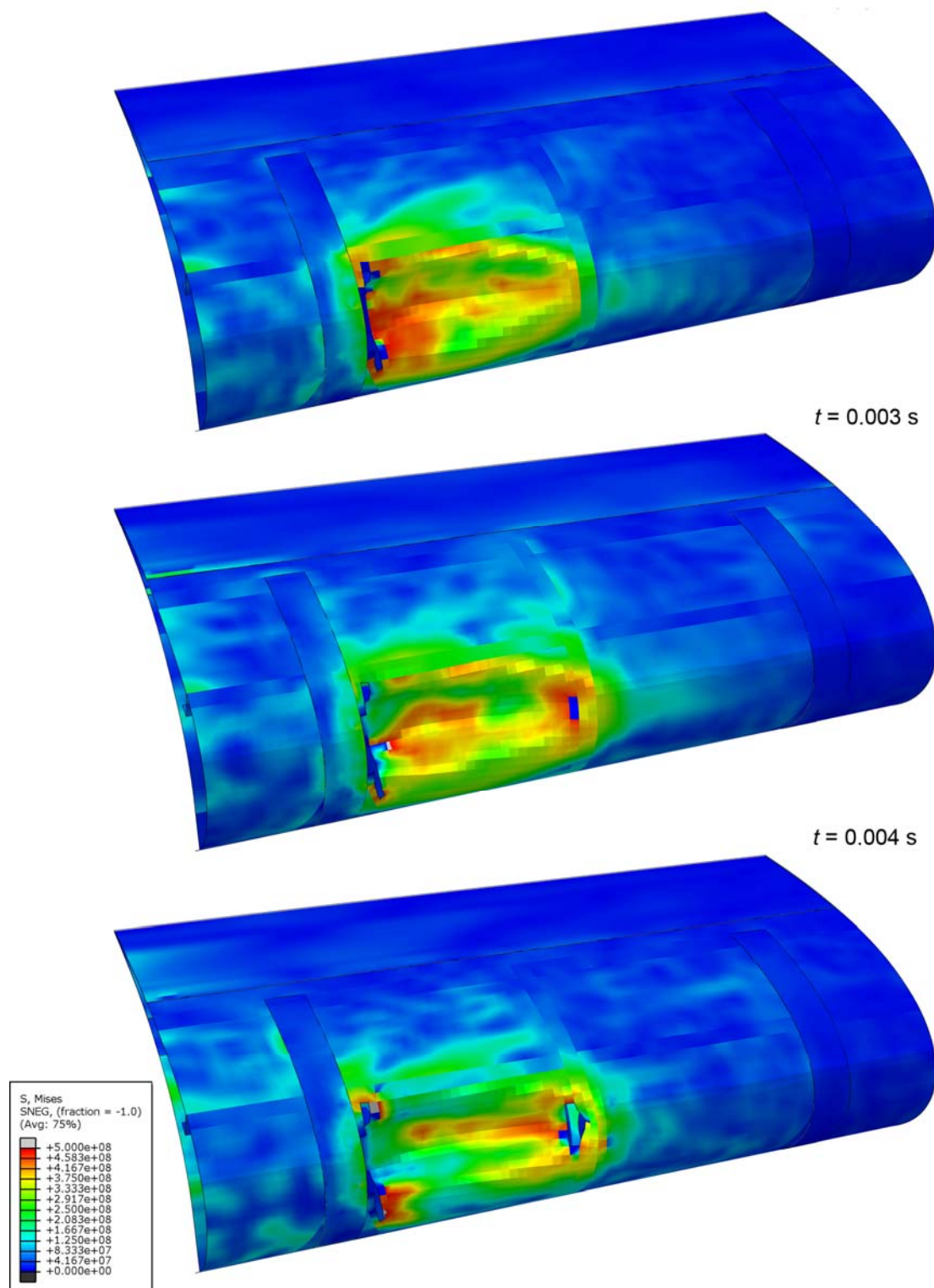
Slika 4.12. Dijagram ukupnih energija za slučaj 1

4.4.3 Slučaj 2

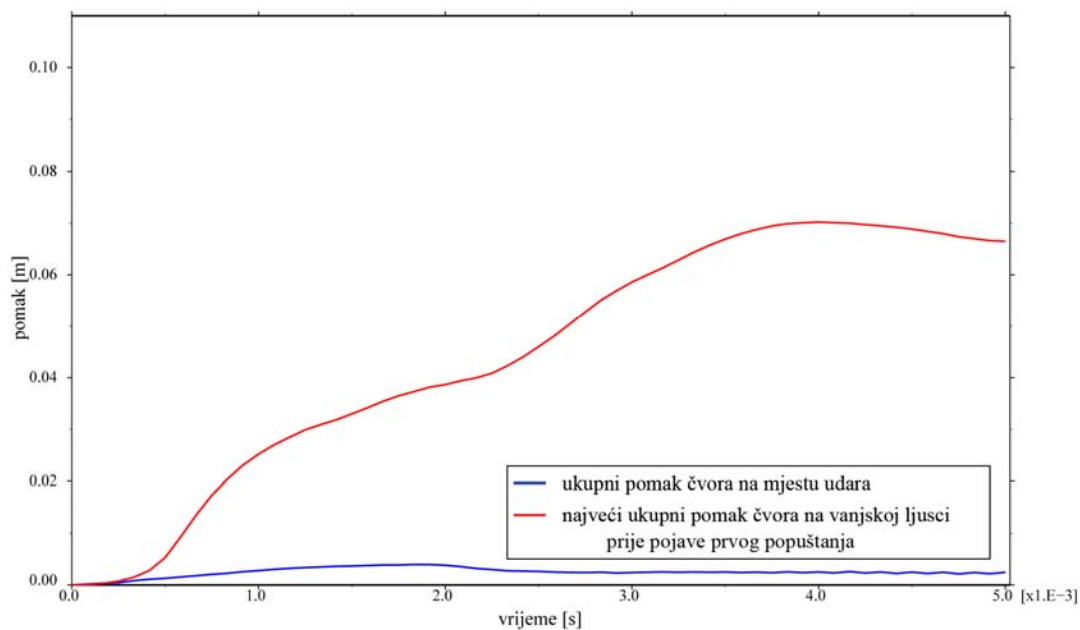


Slika 4.13. Naprezanja po von Misesu za slučaj 2 (0-0.002 s)

Odziv u drugom slučaju je vrlo sličan prvome. Do prvog popuštanja dolazi 2 ms nakon kontakta, prva pukotina se pojavljuje uz glavno rebro a zatim se stvara još jedna uz pomoćno rebro.

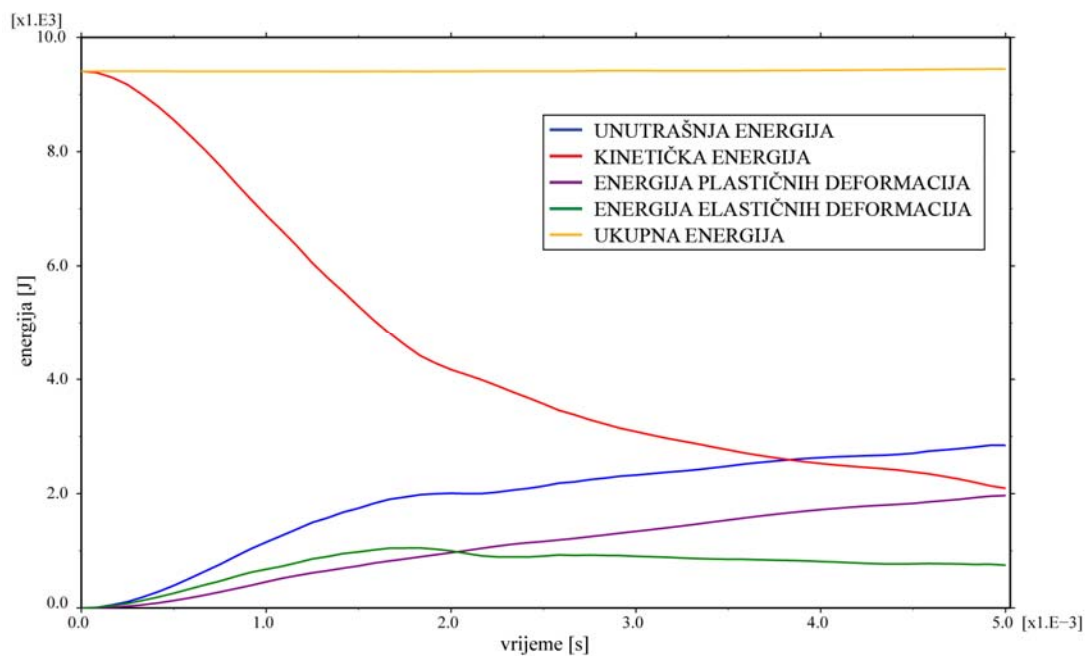


Slika 4.14. Naprezanja po von Misesu za slučaj 2 (0.003-0.005 s)



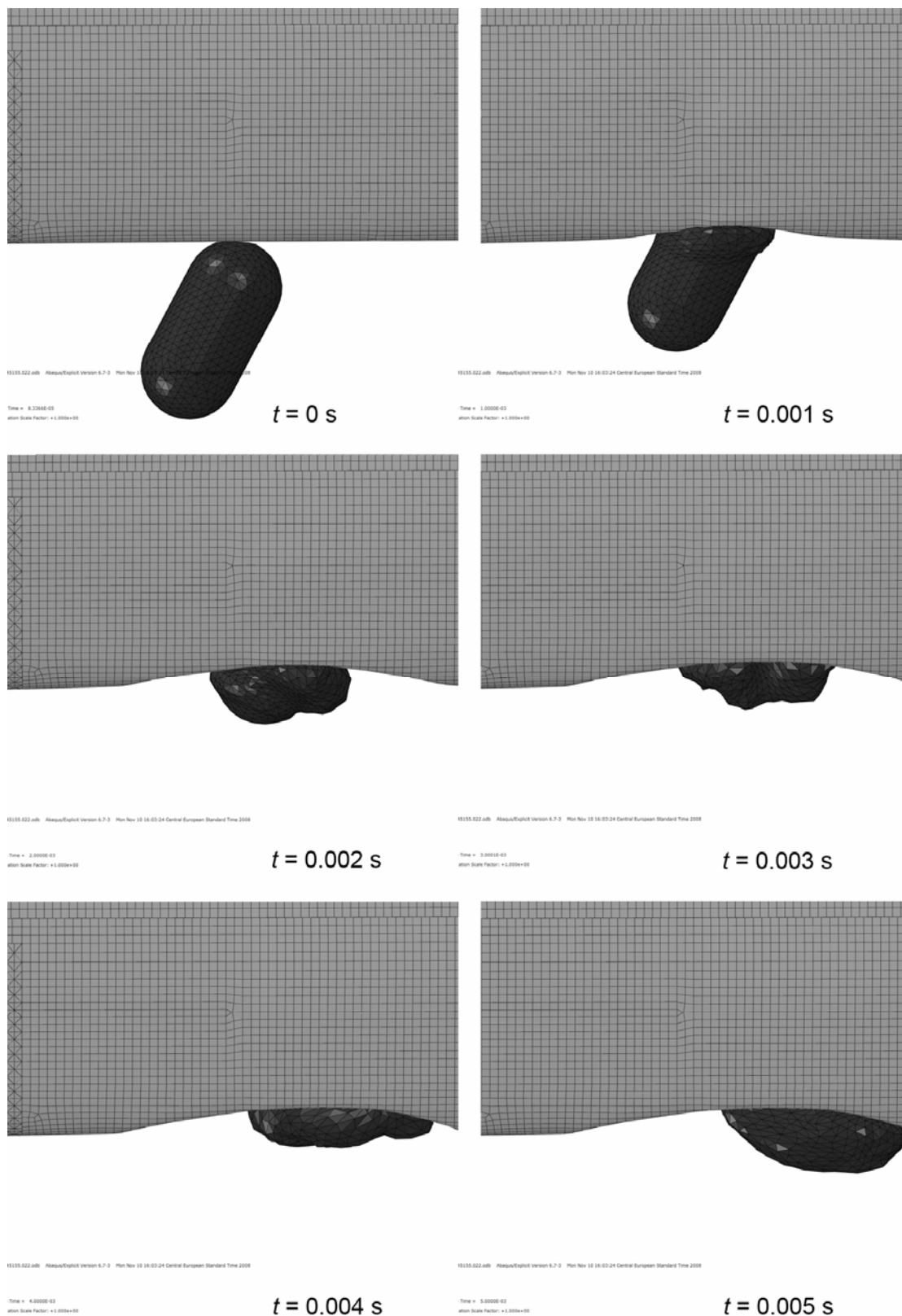
Slika 4.15. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 2

Na dijagramu pomaka, valja primjetiti da je u ovom slučaju pomak čvora na mjestu udara znatno manji nego u prvom slučaju.

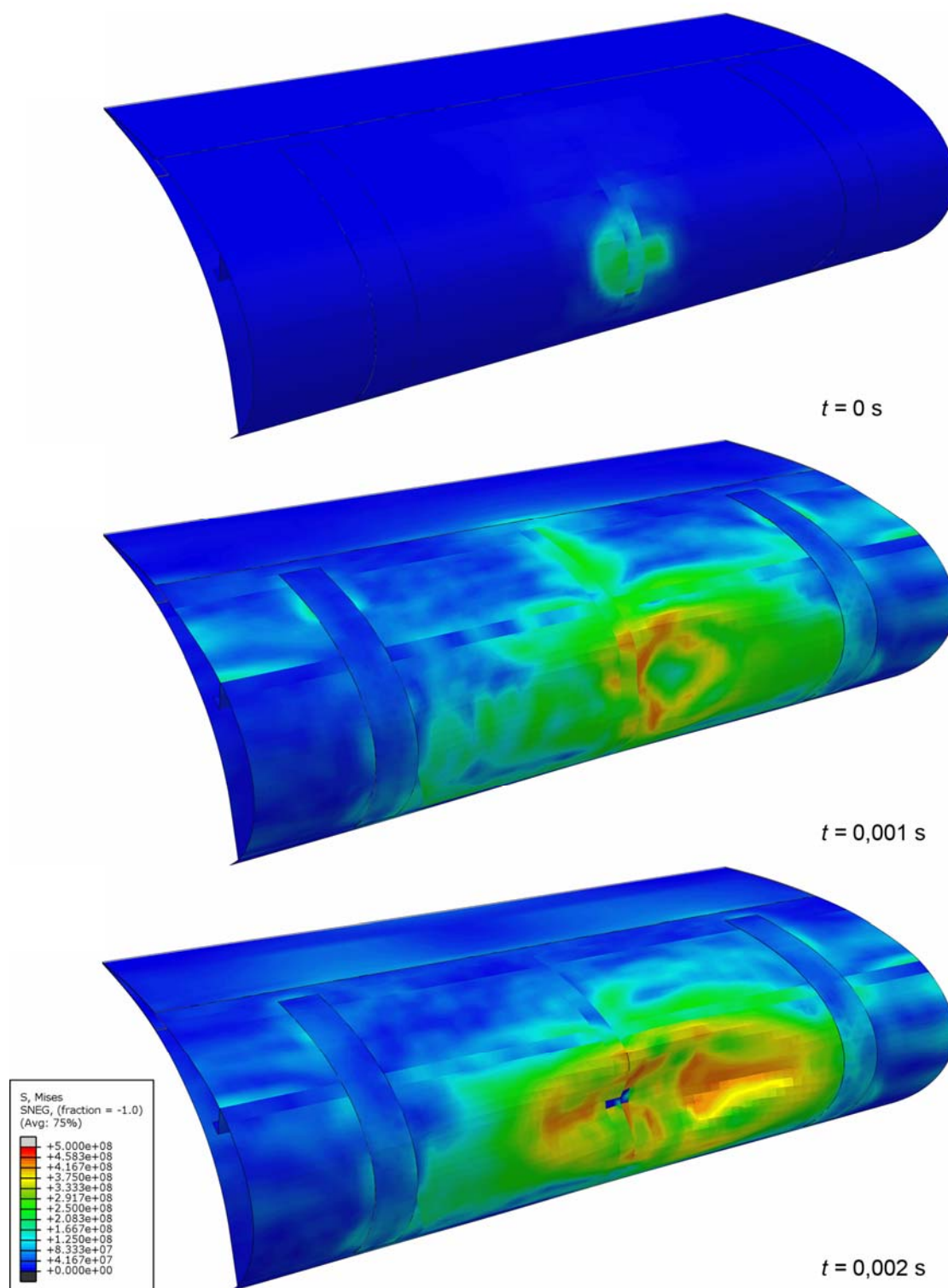


Slika 4.16. Dijagram ukupnih energija za slučaj 2

4.4.4 Slučaj 3

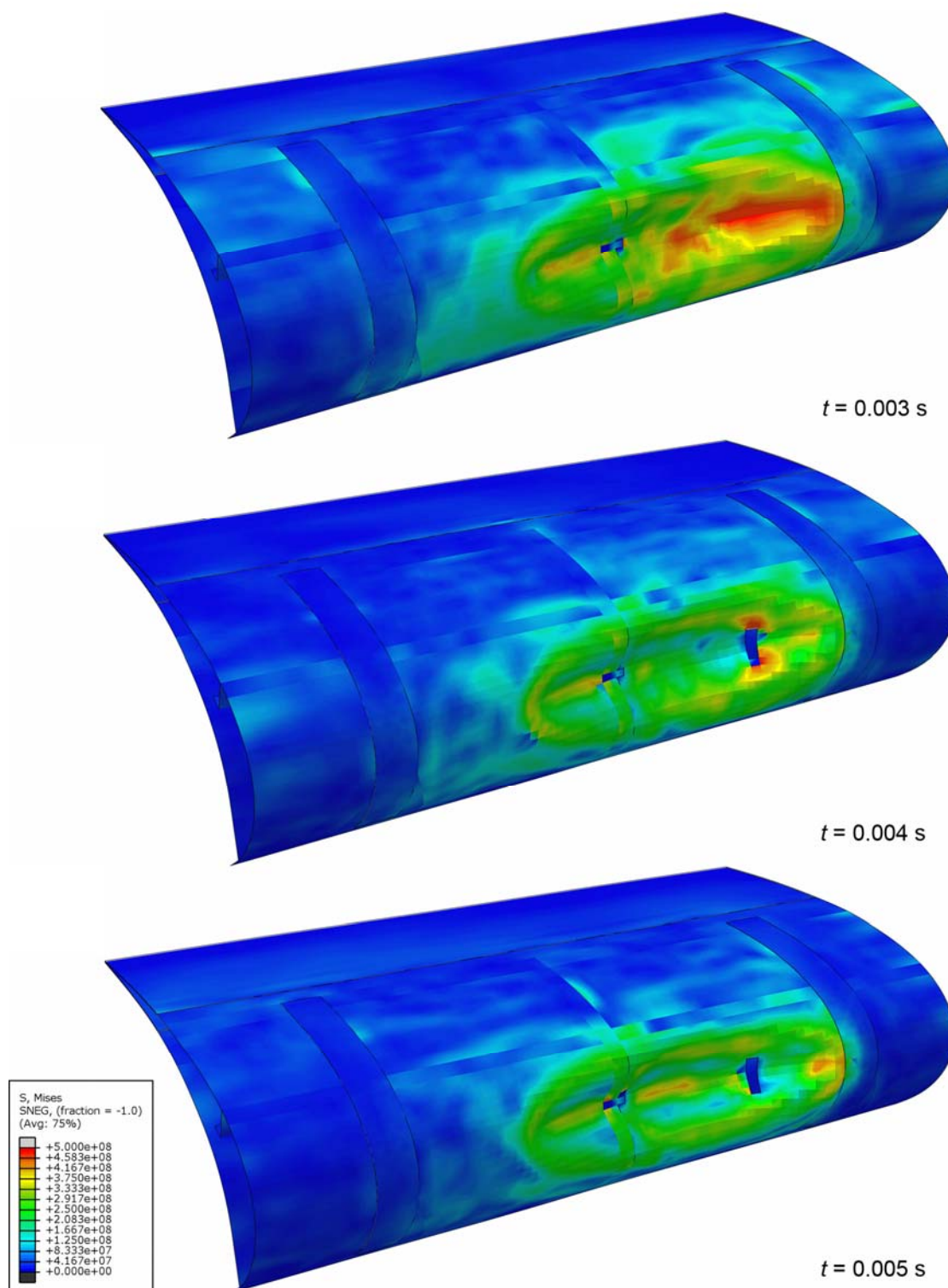


Slika 4.17. Ortogonalni prikaz udara za slučaj 3 (s gornje strane)

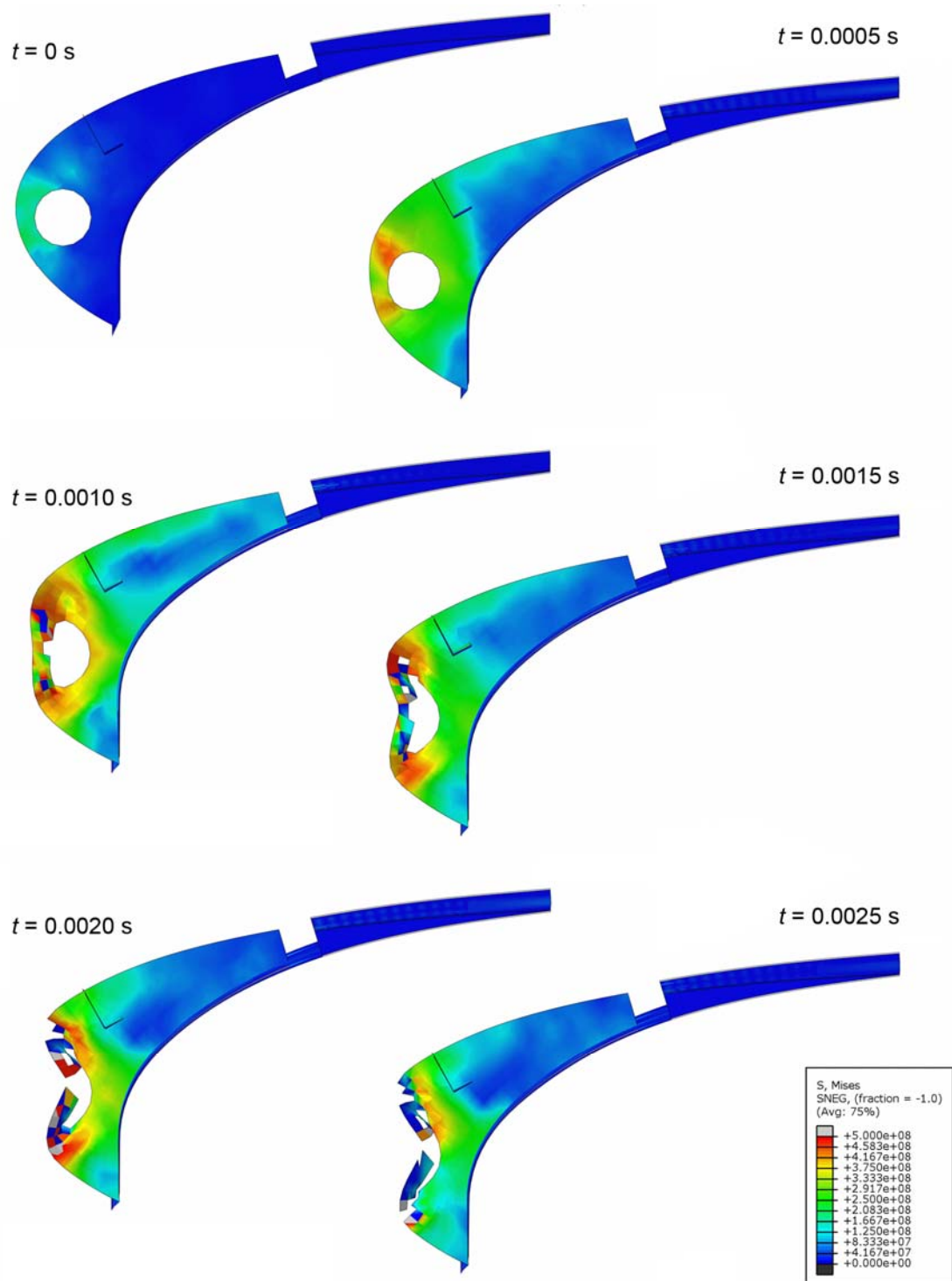


Slika 4.18. Naprezanja po von Misesu za slučaj 3 (0-0.002 s)

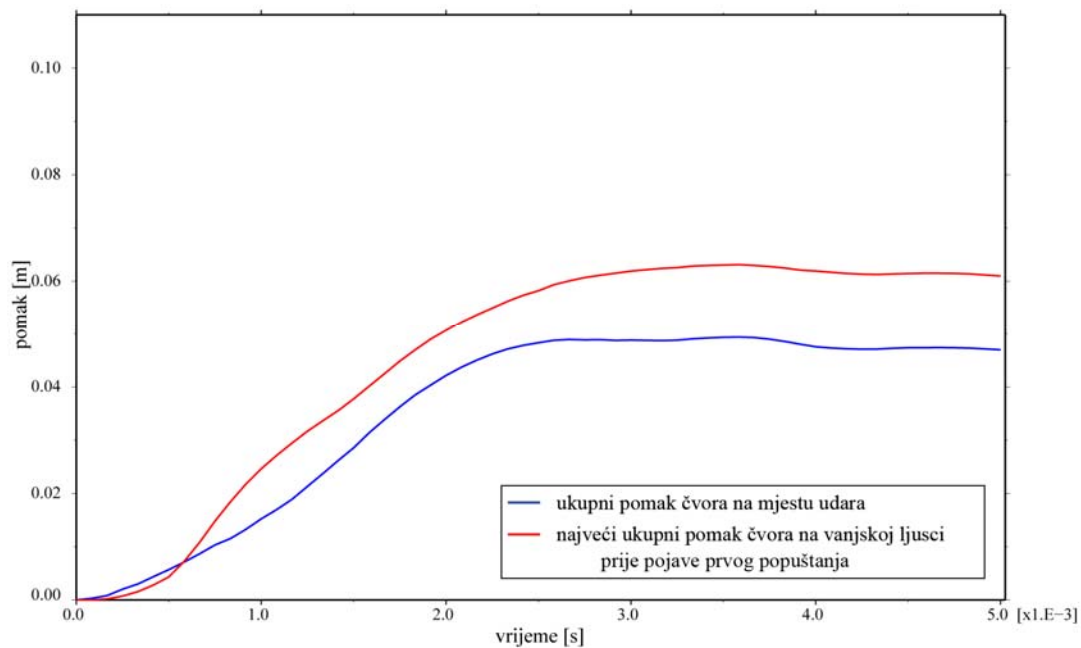
U ovom slučaju do prvog popuštanja dolazi 0.9 ms nakon kontakta i to na središnjem pomoćnom rebru. Iako je analizirano 5 ms, na rebru već nakon 2.5 ms nema daljnjih plastičnih deformacija pa je na slici 4.20. prikazan samo prvih 0.0025 s.



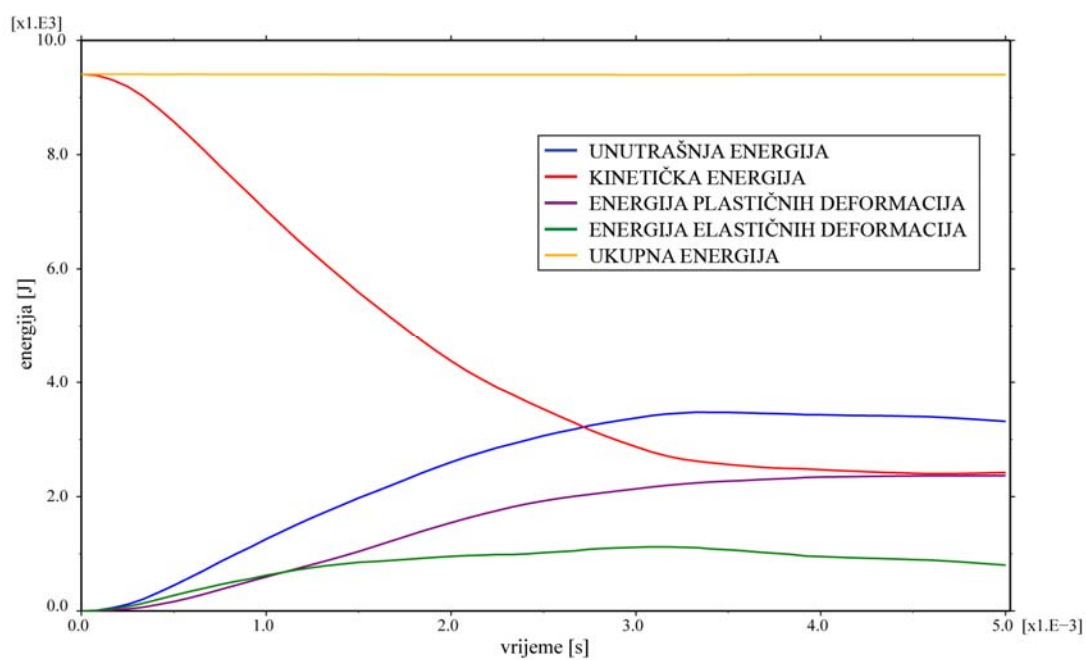
Slika 4.19. Naprezanja po von Misesu za slučaj 3 (0.003-0.005 s)



Slika 4.20. Popuštanje rebra u slučaju 3

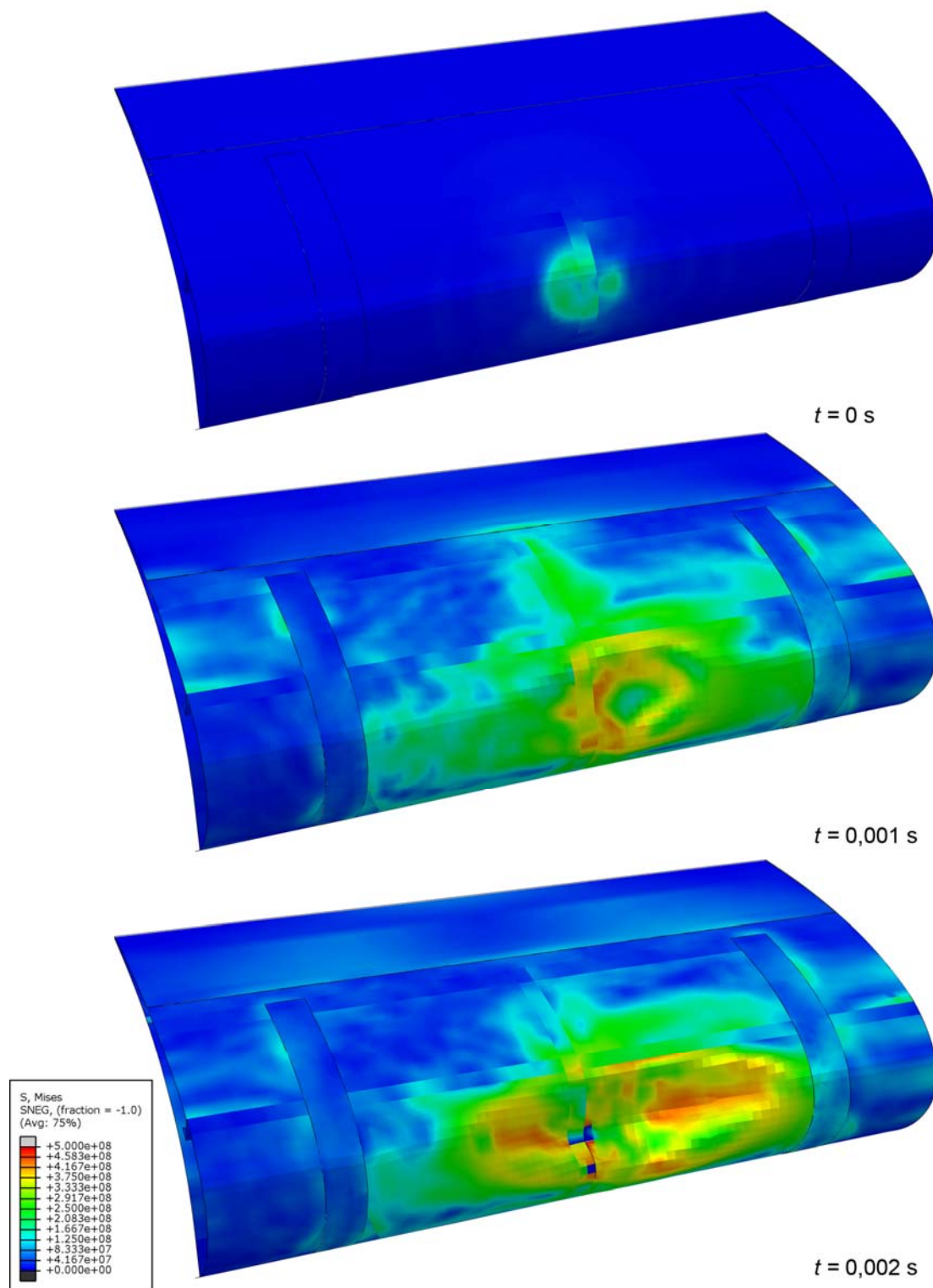


Slika 4.21. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 3



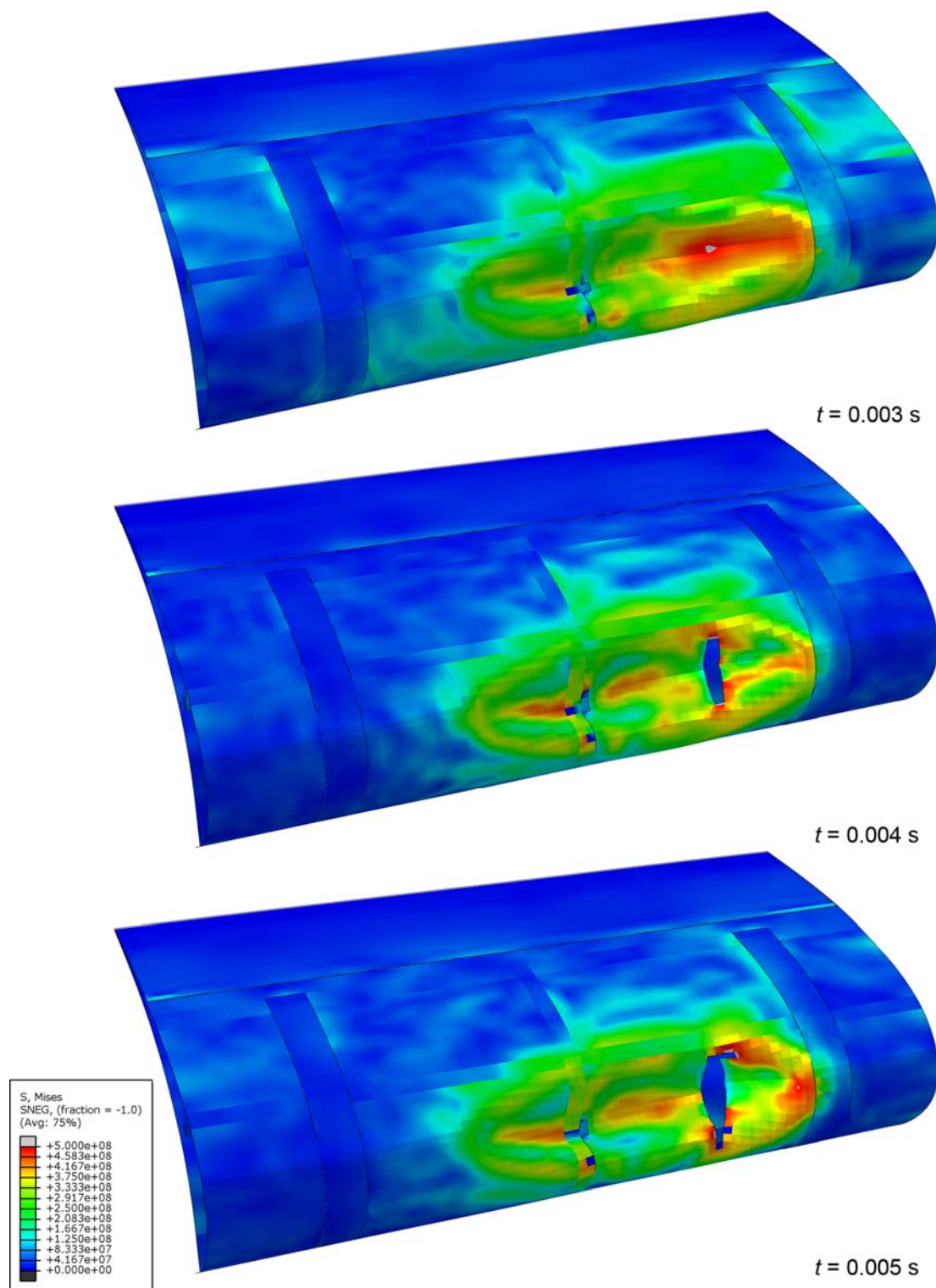
Slika 4.22. Dijagram ukupnih energija za slučaj 3

4.4.5 Slučaj 4

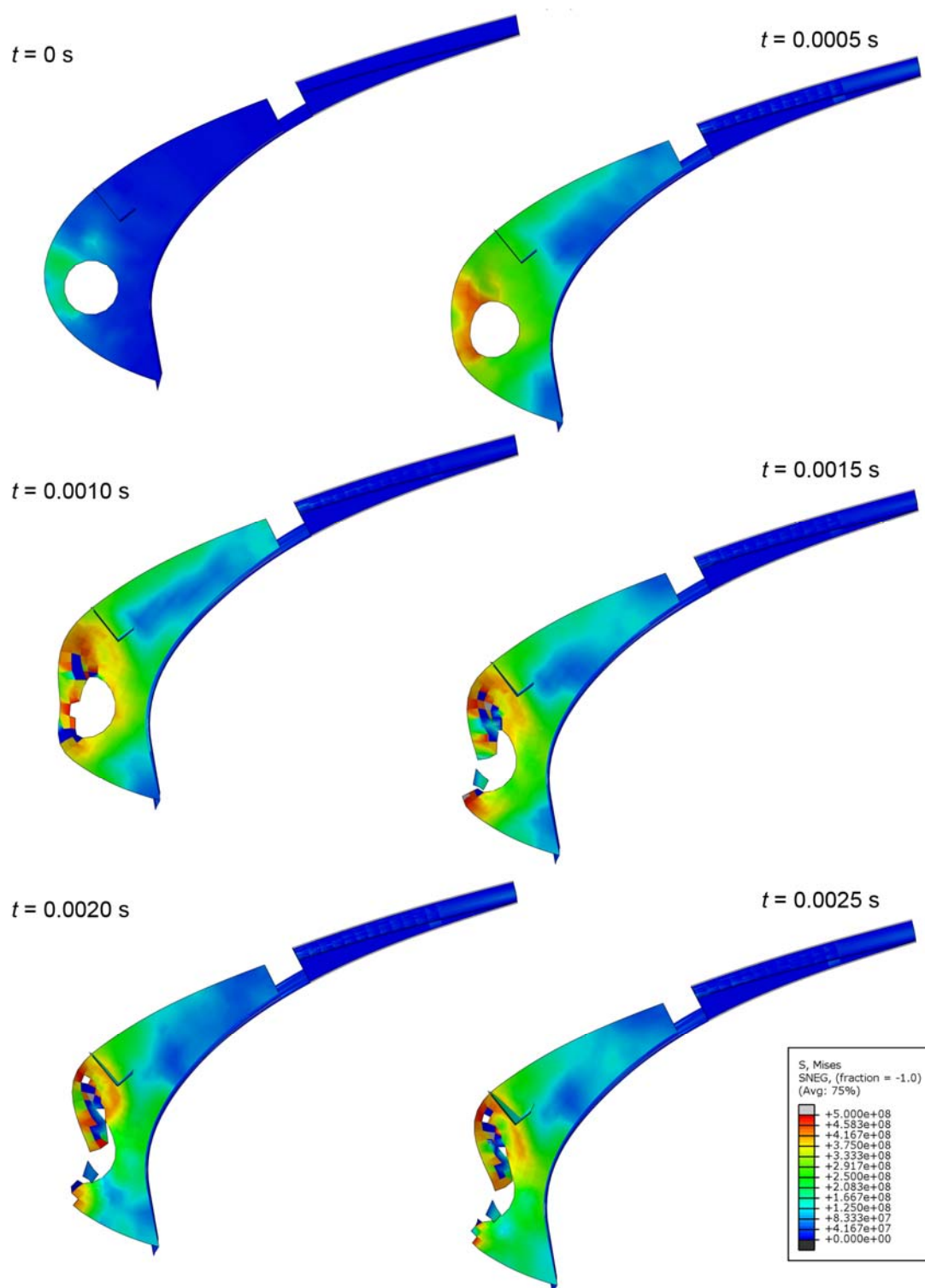


Slika 4.23. Naprezanja po von Misesu za slučaj 4 (0-0.002 s)

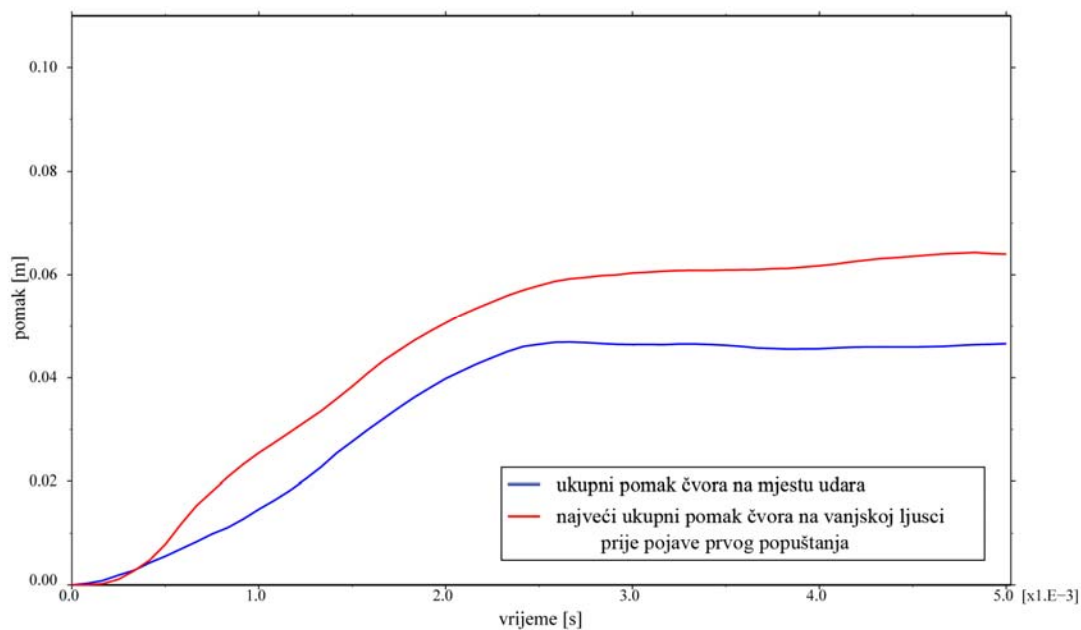
Treći i i četvrti slučaj su također vrlo slični. U ovom slučaju do prvog popuštanja isto dolazi na središnjem pomoćnom rebru 0.9 ms nakon kontakta.



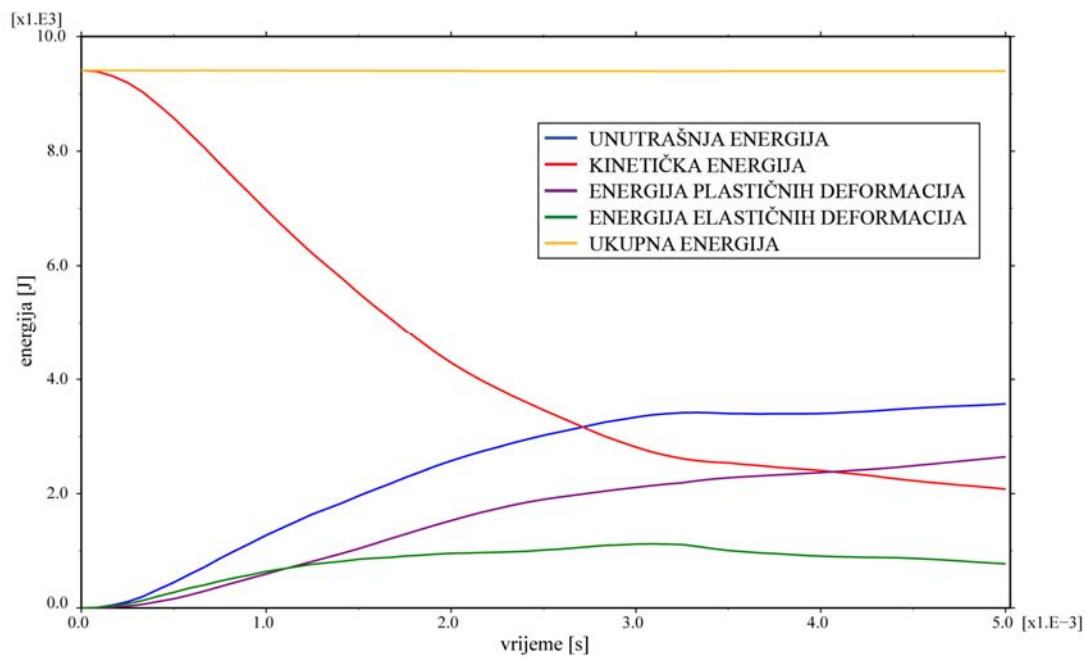
Slika 4.24. Naprezanja po von Misesu za slučaj 4 (0.003-0.005 s)



Slika 4.25. Popuštanje rebra u slučaju 4

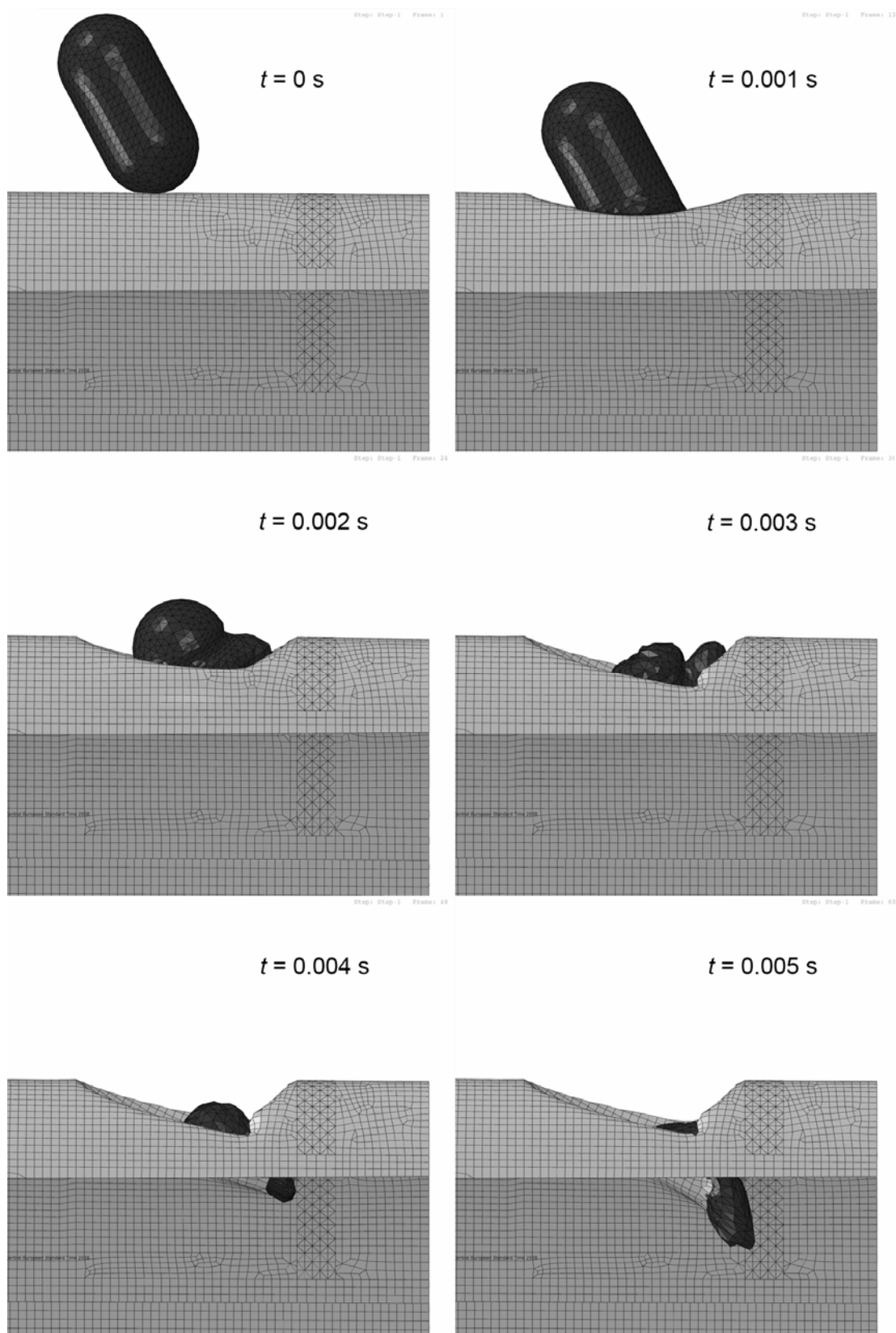


Slika 4.26. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 4

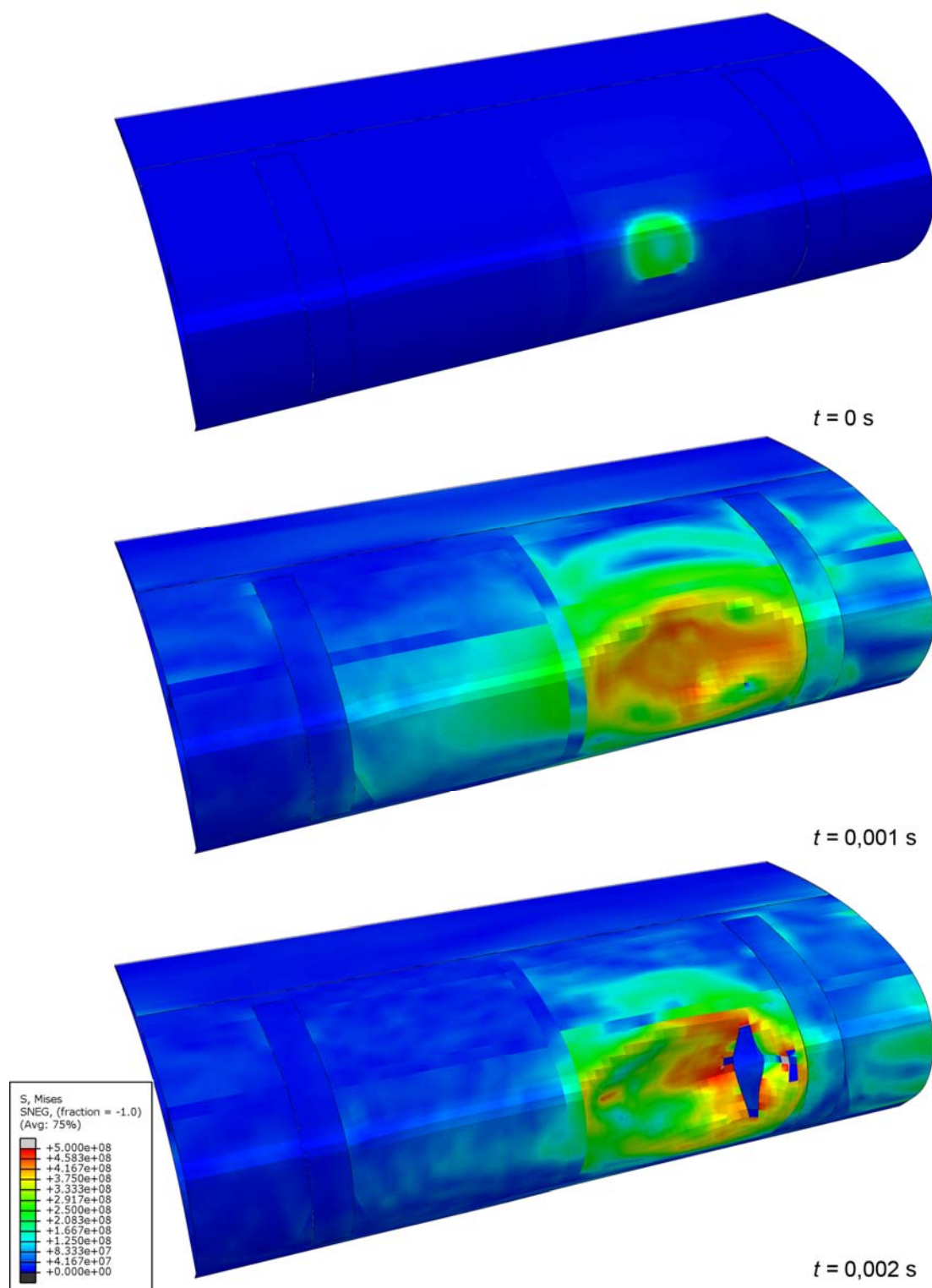


Slika 4.27. Dijagram ukupnih energija za slučaj 4

4.4.6 Slučaj 5

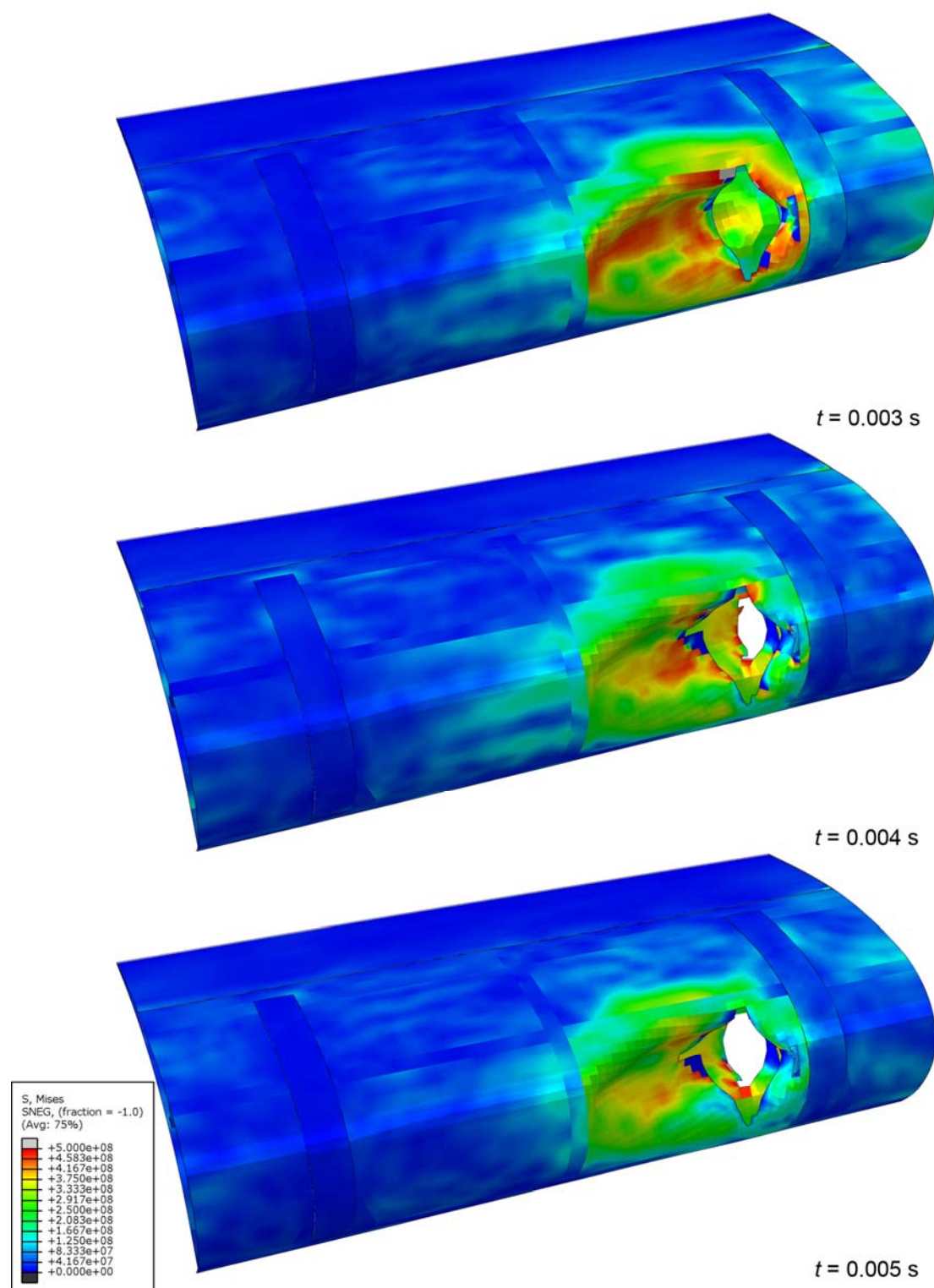


Slika 4.28. Ortogonalni prikaz udara za slučaj 5 (s donje strane)

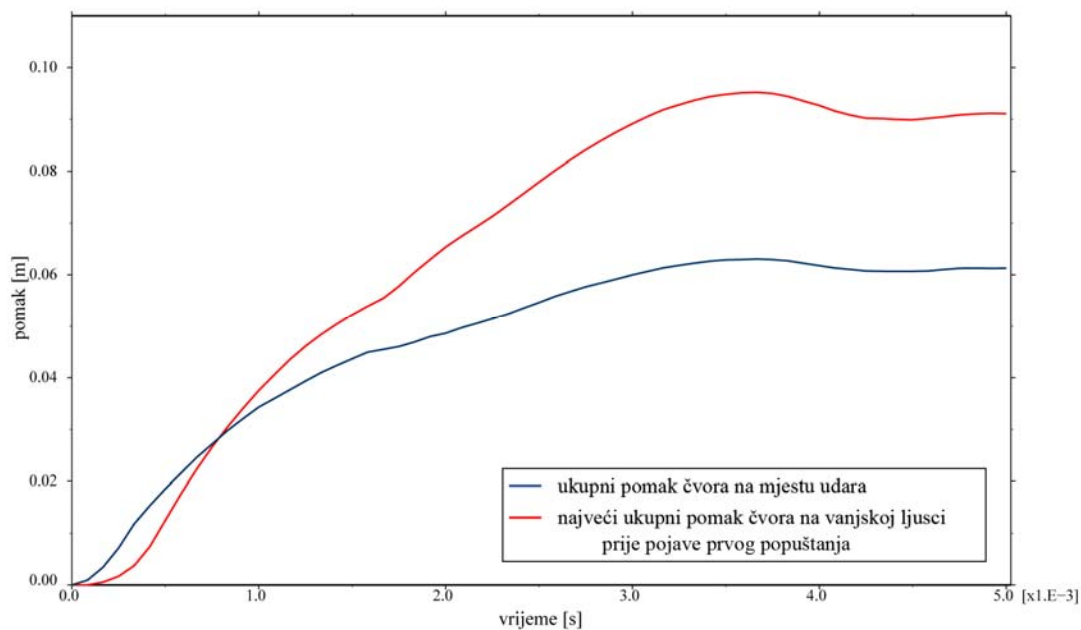


Slika 4.29. Naprezanja po von Misesu za slučaj5 (0.0-0.002 s)

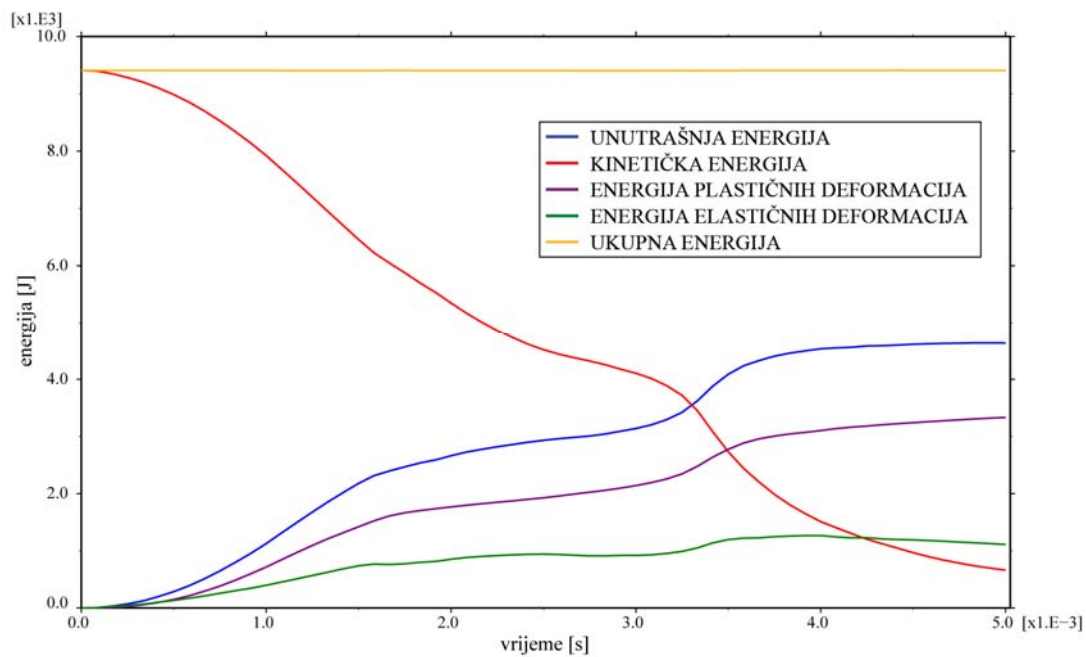
Mjesto udara 3 je jedino mjesto gdje dolazi do potpunog proboja. Prva pukotina se javlja 1.6 ms od prvog kontakta.



Slika 4.30. Naprezanja po von Misesu za slučaj 5 (0.003-0.005 s)

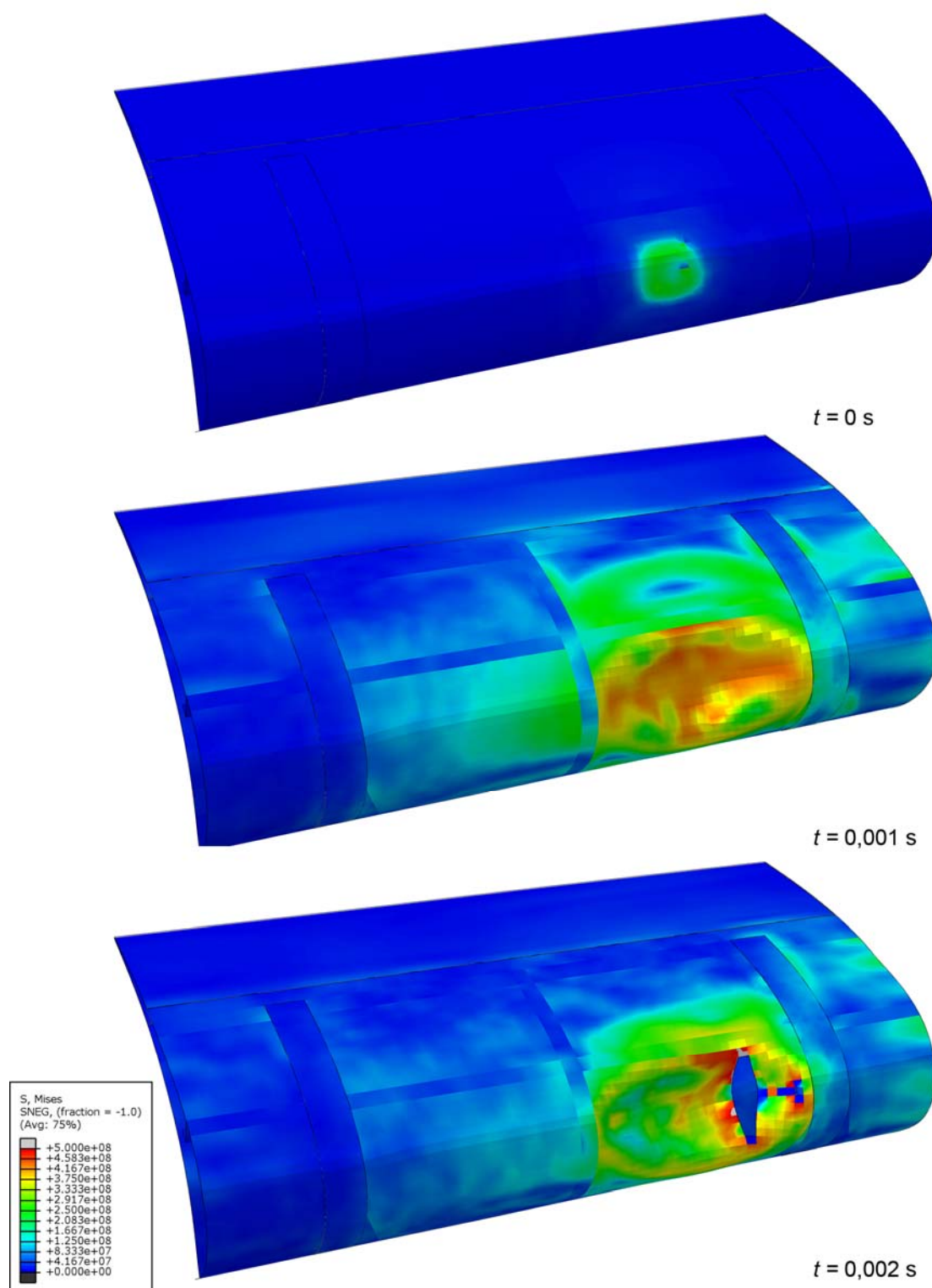


Slika 4.31. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 5



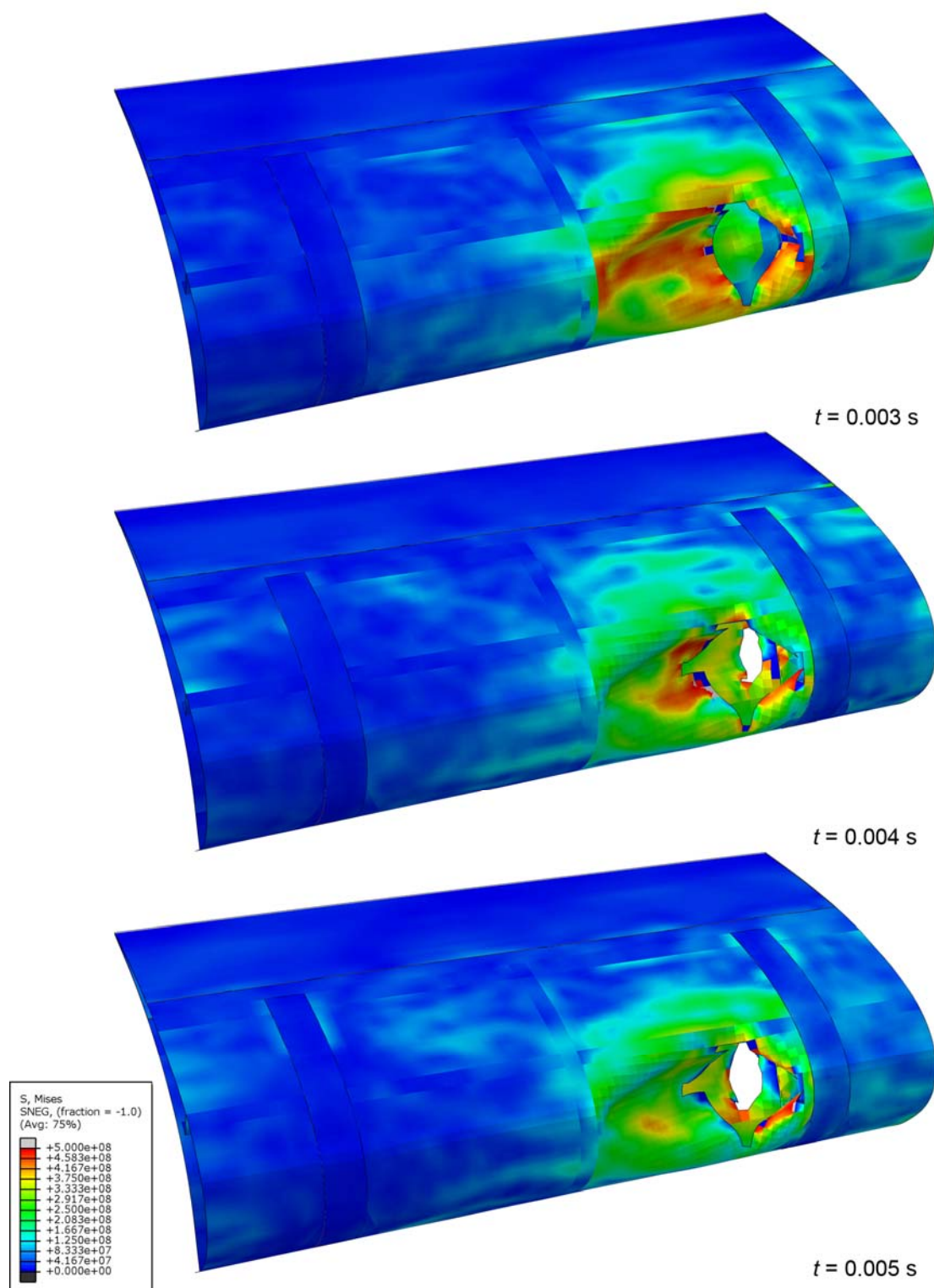
Slika 4.32. Dijagram ukupnih energija za slučaj 5

4.4.7 Slučaj 6

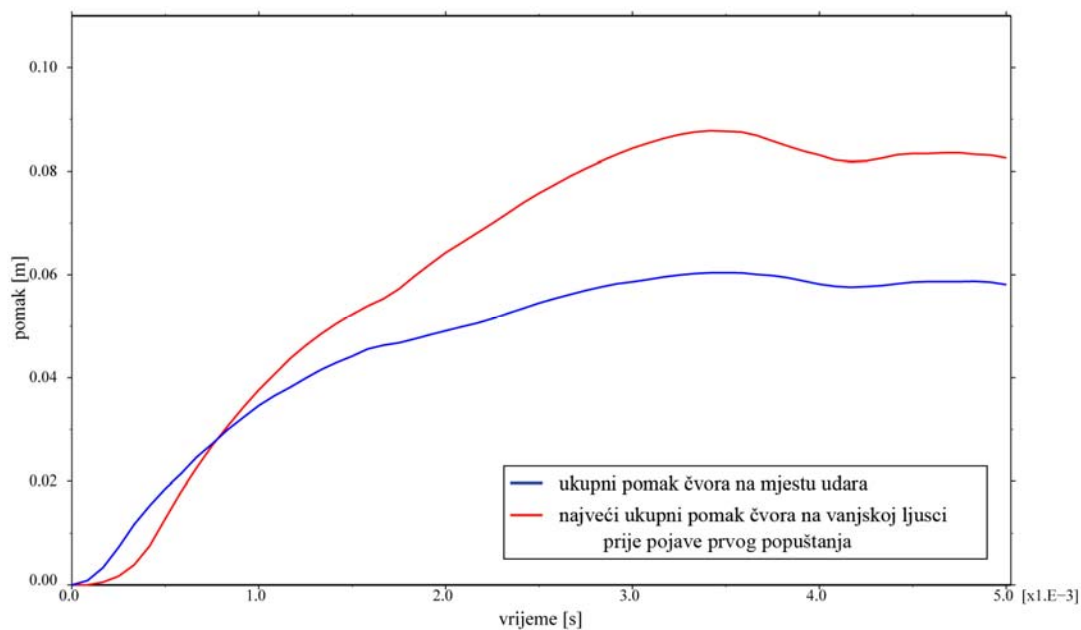


Slika 4.33. Naprezanja po von Misesu za slučaj 6 (0-0.002 s)

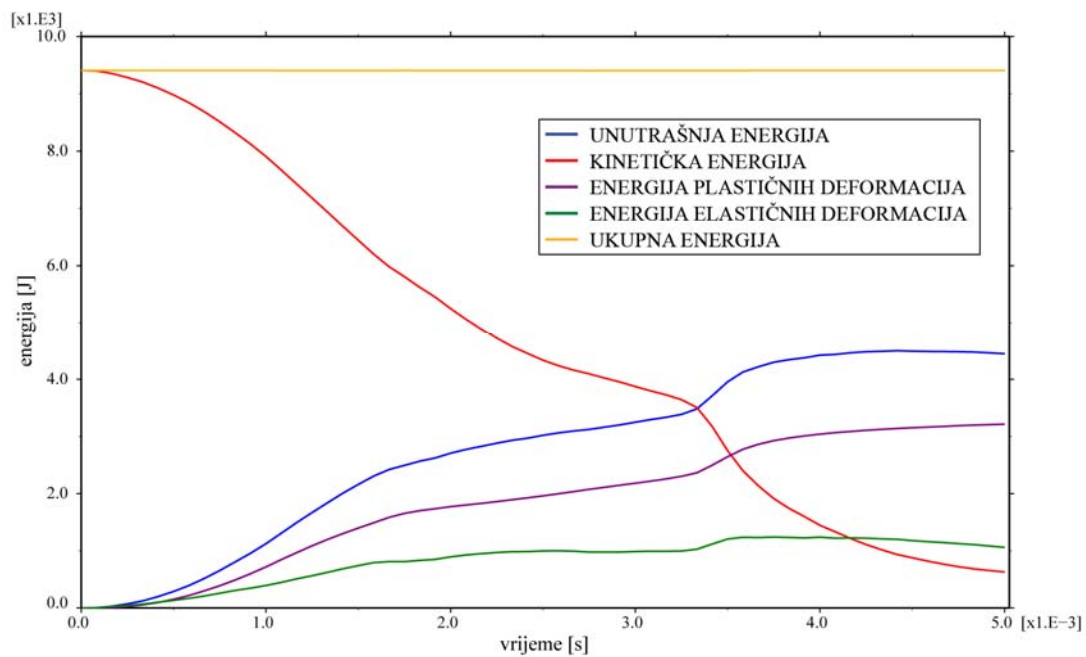
Ponovo dolazido proboja na 3. mjestu. Prva pukotina se također javlja 1.6 ms nakon prvog kontakta.



Slika 4.34. Naprezanja po von Misesu za slučaj 6 (0.003-0.005 s)



Slika 4.35. Dijagram pomaka čvora na mjestu udara i čvora s najvećim pomakom za slučaj 6



Slika 4.36. Dijagram ukupnih energija za slučaj 6

5 Zaključak

Rezultati analize pokazuju da sudari s pticama mogu, ovisno o mjestu i kutu udara, prouzročiti ozbiljna oštećenja na pretkrilcu, pa čak i potpuni proboj. U radu je korištena masa ptice za koju je u FAR propisima navedeno da ne smije prouzročiti pad zrakoplova ili prisilno slijetanje, ali zrakoplovi se mogu sudariti i sa težim pticama. Tako je 1970. g. turbopropelerski zrakoplov Vickers Viscount ostao bez repa i srušio se nakon sudara s labudom, teškim između 5.5 i 7.7 kg (12-17 lbs), iznad istočnog SAD-a [1]. Taj je događaj nagnao zrakoplovne vlasti SAD-a da promjene propise i uvedu zahtjeve za repne površine da izdrže udare ptica do 3.64 kg (8 lb). Za još neke pojedine dijelove zrakoplova, kao što su motori, postoje posebni zahtjevi za udare ptica, no za većinu konstrukcije i dalje vrijedi ograničenje od 1.82 kg.

Osim mase ptice, na štetu nastalu u sudaru čak i više utječe brzina leta. Povećanje brzine od 135 m/s (250 KIAS) na 160 m/s (300 KIAS) povećava energiju udara za čak 44%. Današnji putnički zrakoplovi mogu postići brzine preko 160 m/s (320 KIAS) na malim visinama [1]. Te se brzine ipak rijetko postižu na tim visinama jer je u većini Sjeverne Amerike i Europe na snazi ograničenje brzine leta od 135 m/s na visinama leta manjim od 3000 m (10000 ft). To je pravilo uvedeno radi sprečavanja sudara među zrakoplovima jer se na tim visinama miješaju komercijalni putevi s općim zrakoplovstvom.

Ipak treba imati na umu da u ovom radu neke pojave, koje bi vrlo vjerojatno smanjile oštećenja, nisu uzete u obzir. Tako bi na primjer očvršćavanje aluminijskih legura koje je ovisno o brzini deformacija sasvim sigurno smanjilo nastalu štetu. A to bi svakako trebalo upotrijebiti u nekim budućim radovima na sličnu temu i dati usporedbu za slučajeve sa i bez ovisnosti plastičnog područja o brzini deformiranja. Isto se može reći i za materijal ptice koji nije idealan, i koji bi bio bliži stvarnosti kada bi sadržavao model popuštanja u sebi. Također vrijedilo bi iskoristiti i neke detaljnije kriterije popuštanja koji su dostupni, ali zahtijevaju, kao i sve ranije navedeno, mnogo više podataka o mehaničkim svojstvima materijala koje nije lako pribaviti.

6 Literatura

- [1] P. F. Echenfelder, High speed flight at low altitude: Hazard to Comercial Aviation?, Birdstrike Committee USA/Canada, Vancouver B.C., 2005.
- [2] www.fodnews.com/article1a.html
- [3] A 320 Structural Repair Manual
- [4] A. F. Johnson, M. Holzapfel, Modeling soft body impact on composite structures, Composite Structures 61, 2003, 103-113
- [5] Getting started with Abaqus
- [6] B. Kraut, Strojarski priručnik, Tehnička knjiga, Zagreb, 1976.
- [7] Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures MIL-HDBK-5J, Department of Defense Handbook, Atlantic City, 2003.
- [8] www.hexcel.com, HexWeb Attributes and Properties, Hexcel Composites
- [9] П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин, Сопротивление пластической деформаций металлов и сплавов - Справочник, Москва металлургия 1983.
- [10] E Kirtil, D. Pestal, A. Kollofrath, N. Gähsicke, J. Mendler, Simulating the Impact Behaviour of Composite Aircraft Structures, Proceedings of 2003 ABAQUS User's Conference, 2003, 1-15
- [11] A, Leung, K. Simmonds, M. Chase, A. Geltmacher, Finite Element Modeling of the Impact Loading on Tissue Simulants, Proceedings of 2004 ABAQUS User's Conference, 2004, 409-420
- [12] Abaqus Analysis User's Manual
- [13] Abaqus Theory Manual